

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil et du bâtiment

IMPLANTATION D'UN PLAN EXPÉRIMENTAL POUR
L'ANALYSE D'INFILTRATIONS À L'AIDE DE LYSIMÈTRES
AU SITE D'ENFOUISSEMENT DE ST-NICÉPHORE

Mémoire de maîtrise en science appliquée
Spécialité : Génie civil | Géotechnique environnementale

Mauro DUARTE

Sherbrooke (Québec) Canada

Octobre 2019

MEMBRES DU JURY

Alexandre CABRAL

Directeur de recherche

Ph.D., ing. Département de génie civil et du bâtiment, Université de Sherbrooke

Mathieu NUTH

Évaluateur

Ph.D., ing. Département de génie civil et du bâtiment, Université de Sherbrooke

Tarek ABICHO

Évaluateur

Ph.D., ing. Department of Civil and Environmental Engineering, Florida State University

RÉSUMÉ

Ce document émis dans le cadre d'une étude au second cycle en génie civil fait office de mémoire de maîtrise au domaine de la géotechnique environnementale. Le sujet se concentre sur les infiltrations en recouvrements de sites d'enfouissement de déchets au Québec. Une partie du site de Waste Management (WM) à St-Nicéphore a été construit selon l'ancienne réglementation où il n'y avait aucune exigence liée à la conductivité hydraulique du recouvrement. Étant donné que le sol utilisé est assez perméable, actuellement le site présente une production considérable de lixiviat dont le traitement est coûteux et la présence perturbe l'utilisation bénéfique de biogaz. En plus, des tassements différentiels sont observés sur la surface du terrain. Les flaques d'eau qui s'accumulent sur les concavités formées contribuent aussi à l'excès d'infiltration.

Dans ce contexte, notre groupe de recherche propose un projet de 3 ans pour l'étude des infiltrations à l'aide de lysimètres, pour évaluer des recouvrements alternatifs potentiels à un reprofilage de la couverture existante. D'ailleurs, le projet envisage de valider que l'utilisation des sols contaminés au reprofilage soit capable de contrôler les infiltrations sans répercussions du point de vue environnemental. L'étape primordiale pour atteindre les objectifs du projet comprend la conception et la construction d'un plan expérimental fonctionnel. Celui-là est l'objectif spécifique du projet de maîtrise originaire de ce mémoire.

La conception prévoit la construction de 4 lysimètres de grande échelle, remplis avec différentes configurations expérimentales de sol. Une instrumentation a été méticuleusement conçue en vue de rendre le plan expérimental capable de mesurer continuellement le bilan hydrique de terrain. Des plans de construction et des procédures de contrôle-qualité d'exécution ont été élaborés pour minimiser les erreurs d'implantation du projet. La construction du plan expérimental se fait au cours du printemps et de l'été 2018 et son fonctionnement est surveillé au long d'une année pour la validation de la performance des éléments, ce qui est fondamental pour la continuation du projet.

Le comportement du plan expérimental est analysé par le biais des données acquises par l'instrumentation lors de cette première année de projet. La conformité des instruments est attestée par la cohérence de comportement entre les mesures de précipitation, succion, teneur en eau et percolation. Des analyses comparatives entre ces paramètres confirment la pertinence des réponses et ratifient la capacité de l'instrumentation de représenter la réalité de terrain. En plus, des résultats du suivi de contamination de surface et du taux de percolation des lysimètres sont interprétés pour fournir des indices préliminaires aux réponses du partenaire industriel WM.

En conclusion, il est possible d'affirmer que ce travail de maîtrise termine en accomplissant ses objectifs. Le plan expérimental est bien construit, il est adapté à la réalité de terrain, et il est fonctionnel pour fournir des données fiables qui seront la source des réponses scientifiques du projet et la base pour les solutions aux besoins du site d'enfouissement de St-Nicéphore.

Mots clés : Site d'enfouissement, Sols contaminés, Bilan hydrique, Percolation, Lysimètres.

REMERCIEMENTS

Je voudrais de remercier premièrement à mon directeur de recherche, Alexandre Cabral, pour me faire confiance et pour m'accepter dans son groupe de recherche au moment dont j'avais besoin. Sa contribution a été fondamentale pour la réussite de mon projet d'études au Canada. Je serais éternellement reconnaissant de son engagement pour m'aider dans mon parcours. D'ailleurs, je voudrais remercier pour sa patience, pour sa disponibilité et principalement pour l'attention qu'il porte au bien-être des membres de l'équipe.

Merci au professeur, Tarek Abichou, pour sa constante contribution au cours de ce projet. Merci pour les paroles d'encouragements qui nous ont motivé à continuer le travail bien fait. Sachez aussi que vos orientations ont permis que ce mémoire soit une réalité.

Merci à mon amie Virginie Simard. Il est difficile d'exprimer en quelques mots tous les motifs que j'aurais pour remercier cette personne. C'est vraiment chanceux d'avoir cette fille comme collègue de travail. C'est impressionnant son don naturel pour le leadership. Merci plus une fois de m'encourager dès au début jusqu'à la fin de la maîtrise.

Merci au technicien Jean Guy Lemelin. Même pour une période courte de temps, son appui initial sur le terrain a été décisif pour nous rendre autonomes à continuer l'implantation du plan expérimental. Les connaissances techniques passées sont un ajout majeur dans ma formation. D'ailleurs, c'est lui que m'a présenté le Resto Sean & Bruce, le restaurant préféré de l'équipe à Drummondville!

Merci à ma femme Cintia Oliveira, qui a renoncé sa carrière professionnelle déjà solidifiée au Brésil pour m'accompagner dans ce projet ambitieux d'études dans un nouveau pays. Merci pour la patience, l'affection, et pour être toujours de mon côté dans cette montagne russe. Tu es mon inspiration pour continuer à marcher, tu m'as vraiment transformé d'un garçon en homme. Je t'aime mon amour!

En plus, je remercie à tous mes collègues, du groupe de recherche, qui ont contribué de quelque façon pour ma réussite. Passer des temps avec vous a été une expérience vraiment agréable.

TABLE DE MATIÈRES

1	Introduction	1
1.1	Contexte général	1
1.1.1	Géotechnique environnementale	1
1.1.2	Déchets et l'enfouissement technique	2
1.2	Contexte du projet de recherche	4
1.2.1	Problématique	4
1.2.2	Objectifs du projet de recherche	5
1.2.3	Objective de la maîtrise	6
1.3	Structure du mémoire.....	7
2	État de l'art	8
2.1	Bilan hydrique.....	8
2.2	Sols non saturés	10
2.2.1	Phases du sol.....	10
2.2.2	Capillarité, succion et teneur en eau	11
2.2.3	Potentiel hydraulique et loi de Darcy	14
2.2.4	La courbe de rétention d'eau	16
2.2.5	Fonction de conductivité hydraulique	21
2.2.6	Profil hydraulique	24
2.2.7	Barrière capillaire	26
2.3	Lysimètres.....	31
2.3.1	Développement historique des lysimètres	31
2.3.2	Conception selon Parent et al [2006].....	33
2.4	Sols contaminés au Québec	34
2.4.1	Historique du Règlement québécois	34
2.4.2	Critères de contamination.....	35

3	Activités avant construction	37
3.1	Localisation du plan expérimental	37
3.2	Profil typique du terrain	38
3.3	Caractérisation des sols	39
3.3.1	Distribution granulométrique	40
3.3.2	Classification et nomenclature des sols	41
3.3.3	Conductivité hydraulique saturée	43
3.3.4	CRE et FCH	47
3.4	Conception des lysimètres	53
3.4.1	Fonction de chaque lysimètre	53
3.4.2	Dimensionnement et concept du plan expérimental	54
3.4.3	Validation par modélisation numérique	57
3.4.4	Design de couches	61
3.5	Instrumentation	64
3.5.1	Sonde de teneur en eau	65
3.5.2	Tensiomètre	69
3.5.3	Compteur basculant (tipping bucket)	72
3.5.4	Plaque de Tassement	73
3.5.5	Station Météorologique	74
3.5.6	Nomenclature de projet	75
4	Travail de Terrain	76
4.1	Construction et ces étapes	76
4.2	Contrôle de qualité de la construction	80
4.3	Procédure standard d'opération	84
4.4	Solution de problèmes et améliorations	85
4.4.1	Excès de l'eau sur le terrain de base des lysimètres	85

4.4.2	L'eau de ruissellement.....	86
4.4.3	Réparations globales après l'hiver.....	88
4.4.4	Procédure de saturation du tensiomètre T4e.....	91
4.4.5	Influence solaire sur les lectures du DL6	95
5	Suivi de fonctionnement et interprétation de données.....	98
5.1	Validation de performance de l'instrumentation	98
5.1.1	Conformité générale de l'acquisition des données	98
5.1.2	Données météorologiques	100
5.1.3	Succion	102
5.1.4	Teneur en eau.....	106
5.1.5	Tassement	110
5.2	Reconstitution de la CRE à l'échelle du terrain.....	111
5.2.1	Recouvrement.....	111
5.2.2	Sol AB et BC	113
5.3	Analyse préliminaire liée aux besoins du partenaire industriel	114
5.3.1	Suivi de la contamination chimique	114
5.3.2	Taux de percolation de la première année	117
6	Conclusion.....	121
7	Bibliographie	124
8	Annexes	129
8.1	FICHIER EXCEL DE LISSAGE DE LA CRE.....	129
8.2	DONNÉES DE TERRAIN PAR LYSIMÈTRE	130
8.3	SUIVI DE FONCTIONNEMENT DE L'INSTRUMENTATION	133
8.4	SUIVI DE CONTAMINATION DES SOL DE SURFACE	134

LISTE DE FIGURES

Figure 2.1 - Schéma du bilan hydrique dans une cellule d'enfouissement	9
Figure 2.2 - Représentation des phases du sol: (a) élément du sol non saturé [adapté de Fredlund 1993]; (b) diagramme de phases [tiré de Holtz et Kovacs, 1991]	11
Figure 2.3 - Géométrie d'un ménisque formé par l'action capillaire de l'eau dans un tube [tiré de INPL, 2019]	12
Figure 2.4 - Tubes capillaires montrant les différents rayons de courbure [tiré de Fredlund et Rahardjo, 1993]	13
Figure 2.5 - Ménisque capillaire formé dans le contact des grains du sol [tiré de Souza Pinto, 2000]	13
Figure 2.6 - La CRE selon différents des types de sols.	17
Figure 2.7 - Les zones de saturation de la CRE.....	18
Figure 2.8 - FCH selon différents types de sols.	22
Figure 2.9 - Profil de succion développée en un sol soumise à un écoulement en régime permanent	24
Figure 2.10 - Profil de degré de saturation et de succion dans une CEBC [adapté de Lacroix Vachon, 2008].....	26
Figure 2.11 - Schéma du comportement de l'écoulement dans une barrière inclinée	29
Figure 2.12 - Profil de succion dans une barrière inclinée	30
Figure 2.13 - Profil schématique d'un écoulement latéral aux lysimètres [Adapté de Chiu et Shackelford, 2000].....	32
Figure 2.14 - Principe de conception des lysimètres [tiré de Cabral et al, 2019].....	33
Figure 3.1 - Localisation du site [tiré de Google Maps 2019-09-14]	37
Figure 3.2 - Stratigraphie typique de la couverture au-dessus des déchets	39
Figure 3.3 - Emplacement des puits d'observation	39
Figure 3.4 - Courbes granulométriques des sols de construction du plan expérimental	41
Figure 3.5 - Triangle USDA de classification de texture [Soil Survey Division Staff 1993] ...	42
Figure 3.6 - Infiltromètre Mini Disk [(a) tiré de Decagon,2005; (b et c) tiré de Meter Environnement, 2017]	43
Figure 3.7 – Perméamètre KSAT Meter [tiré de Meter Group AG, 2017]	44

Figure 3.8 - Système HYPROP [tiré de Meter Group AG, 2015].....	48
Figure 3.9 - CRE représentative de chaque type de sol du projet	50
Figure 3.10 - FHC représentative de chaque type de sol du projet	50
Figure 3.11 - FCH du sol BC obtenue par deux différentes approches.....	51
Figure 3.12 - Détermination graphique (FCH) de la hauteur des lysimètres	55
Figure 3.13 - Cellule typique des lysimètres	56
Figure 3.14 - Vue en plan du schéma des cellules	56
Figure 3.15 - Capture d'écran de la modélisation avec les conditions de contours utilisés.....	59
Figure 3.16 - Erreur de la condition initiale de teneur en eau	60
Figure 3.17 - Erreur de la condition initiale de l'écoulement d'eau.....	60
Figure 3.18 - Coupe de profil avec les instrumentations du L1	62
Figure 3.19 - Coupe de profil avec les instrumentations du L2	62
Figure 3.20 - Coupe de profil avec les instrumentations du L3	63
Figure 3.21 - Coupe de profil avec les instrumentations du L4	63
Figure 3.22 - Instrumentation pour la mesure de la teneur en eau	65
Figure 3.23 - Exemple des points de calibration réalisé en laboratoire.....	66
Figure 3.24 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol recouvrement (cover).....	67
Figure 3.25 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol AB (AB soil).....	67
Figure 3.26 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol BC (BC soil)	68
Figure 3.27 - Courbes de calibration du 5TM pour la terre végétale (Topsoil)	68
Figure 3.28 - Instrumentation pour la mesure de succion	69
Figure 3.29 - Courbe de calibration des DL6 en interceptant par zéro	70
Figure 3.30 - Correction de la courbe de calibration des DL6	71
Figure 3.31 - Instrumentation pour comptabilisation de l'eau [tiré de Hoskin Scientifique, 2019]	72
Figure 3.32 - Schéma des plaques de tassement.....	73
Figure 3.33 - Système de contrôle des tassements	74
Figure 3.34 - L'emplacement des stations météorologiques Davis Vantage Pro 2	74
Figure 4.1 - Excavation	77
Figure 4.2 - Montage coffrage.....	77

Figure 4.3 - Emplacement geomembrane.....	77
Figure 4.4 - Drain de fond	77
Figure 4.5 - Protection du drain de fond.....	77
Figure 4.6 - Drain de la cellule	77
Figure 4.7 - Géotextile de protection.....	78
Figure 4.8 - Couche drainante	78
Figure 4.9 - Remplissage avec sols	78
Figure 4.10 - Compactage des couches	78
Figure 4.11 - Installation de l'instrumentation	78
Figure 4.12 - Exécution des bermes	78
Figure 4.13 - finalisation des pentes des cellules	79
Figure 4.14 - Couverture finale en terre végétale	79
Figure 4.15 - Vue aérienne du plan expérimental ensuite à la construction (juin 2018).....	79
Figure 4.16 - Vue aérienne du plan expérimental déjà végété (juillet 2018)	79
Figure 4.17 - Topométrie avec station totale.....	80
Figure 4.18 - Emplacement des lysimètres.....	80
Figure 4.19 - Niveau laser	80
Figure 4.20 - Ajuste de niveau laser	80
Figure 4.21 - Compactage manuel des couches de sol.....	81
Figure 4.22 - Essai de cône de sable.....	81
Figure 4.23 - Nucléodensimètre	81
Figure 4.24 - Échantillonnage des sols utilisés pour l'inventaire du projet	82
Figure 4.25 - Mélange étanche autour des fils.....	83
Figure 4.26 - Mélange étanche à la bordure	83
Figure 4.27 - Tipping bucket	83
Figure 4.28 - Nivellement des tipping buckets.....	83
Figure 4.29 - Accumulation d'eau à la surface.....	85
Figure 4.30 - Drain de fond des cellules.....	85
Figure 4.31 - Exécution du drain de surface.....	86
Figure 4.32 - Drain de surface	86

Figure 4.33 - Exécution de l'exutoire.....	87
Figure 4.34 - Exutoire finalisé avec gravier	87
Figure 4.35 - L'ensemble du nouveau système de drainage de surface	87
Figure 4.36 - Baril pour l'eau de surface.....	87
Figure 4.37 - Tipping bucket installé.....	87
Figure 4.38 - Cumulation de neige hiver 2018/2019.....	88
Figure 4.39 - Équipements enfouis dans la neige	88
Figure 4.40 - Base en bois traité	89
Figure 4.41 - Couche drainante	89
Figure 4.42 - Ceinture de stabilité	89
Figure 4.43 - Préparation de la couche drainante	89
Figure 4.44 - Nouvelle base en béton	89
Figure 4.45 - Tuyaux en PVC brisés	90
Figure 4.46 - Tuyaux en ABS brisés	90
Figure 4.47 - Appui en bois en format de fourchette.....	90
Figure 4.48 - Nouveaux tuyaux flexibles	90
Figure 4.49 - Régularisation de surface.....	90
Figure 4.50 - Nettoyage des drains de surface.....	90
Figure 4.51 - Câbles rebranchés aux portes.....	91
Figure 4.52 - Câbles attachés au poteau en bois.....	91
Figure 4.53 - Première méthode de saturation des T4e	92
Figure 4.54 - Valeurs de succion enregistrées pour les 4 lysimètres en 2018.....	92
Figure 4.55 - Nouvelle méthode de saturation à l'aide d'une pompe à vide.....	93
Figure 4.56 - Valeurs de succion enregistrées pour les 4 lysimètres en 2019.....	94
Figure 4.57 - L'écran avec les lectures de succion fournies par DeltaLink	95
Figure 4.58 - Boîte en métal et peinture noire.....	96
Figure 4.59 - Protection thermique de la boîte	96
Figure 4.60 - Comparaisons entre les distorsions de lecture, température et radiation solaire	96
Figure 4.61 - Comparaison de la radiation horaire entre deux jours spécifiques	97
Figure 5.1 - Graphique de la précipitation/pluviométrie de la période d'analyse.....	101

Figure 5.2 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L2.....	103
Figure 5.3 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L3.....	103
Figure 5.4 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L4.....	103
Figure 5.5 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L2.....	104
Figure 5.6 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L3.....	105
Figure 5.7 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L4.....	105
Figure 5.8 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations pour L2.....	107
Figure 5.9 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations pour L3.....	107
Figure 5.10 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations de L4	107
Figure 5.11 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L2.....	108
Figure 5.12 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L3.....	109
Figure 5.13 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L4.....	109
Figure 5.14 - Valeurs des lectures des plaques de tassement	110
Figure 5.15 - Reconstitution de la CRE du sol recouvrement selon des mesures de terrain...	112
Figure 5.16 - Fonction de conductivité hydraulique pour le matériau de recouvrement.....	112
Figure 5.17 - Reconstitution de la CRE pour les sols AB et BC.....	113
Figure 5.18 - Mesures des taux de percolation des 4 lysimètres par rapport à la précipitation	117

Figure 5.19 - Équipement pour l'auscultation	118
Figure 5.20 - Exécution de l'auscultation des tuyaux	118
Figure 5.21 - Taux de percolation pour la période d'analyse à l'automne 2018.....	119
Figure 5.22 - Taux de percolation pour la période d'analyse au printemps 2018.....	119
Figure 5.23 - Percolation cumulative pour la première année de fonctionnement du plan expérimental	120
Figure 8.1 - Précipitations, percolation, teneur en eau et succion pour L1	130
Figure 8.2 - Précipitations, percolation, teneur en eau et succion pour L2	130
Figure 8.3 - Précipitations, percolation, teneur en eau et succion pour L3	131
Figure 8.4 - Précipitations, percolation, teneur en eau et succion pour L4	131
Figure 8.5 - Données de sondes de surface (couche évapotranspirative).....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Méthodes de laboratoire pour la détermination de la CRE	19
Tableau 2.2 - Modèles de lissage de la CRE [adapté de Lacroix Vachon, 2008]	20
Tableau 2.3 - Modèles de lissage de la FCH [adapté de Lacroix Vachon, 2008]	23
Tableau 3.1 - Épaisseur des couches de la couverture sur place	38
Tableau 3.2 - Densité des grains solides (D_s) et classification des sols selon leur granulométrie	41
Tableau 3.3 - Valeurs de la conductivité hydraulique pour les sols du plan expérimental	45
Tableau 3.4 - Valeurs de conductivités hydrauliques pour les aquifères non consolidés (DIN18130).....	46
Tableau 3.5 - Classes de perméabilité à l'eau [adaptée de DIN 18130]	47
Tableau 3.6 - Classification des sols utilisés au plan expérimental selon le niveau de perméabilité	47
Tableau 3.7 - Valeurs des paramètres hydrauliques du sol obtenus en laboratoire [lissé par Van Genuchten, 1980]	52
Tableau 3.8 - Valeurs typiques des paramètres pour les sols (USDA) selon [Carsel and Parrish, 1988].....	52

Tableau 3.9 - Valeurs des hauteurs potentielles des parois des lysimètres	55
Tableau 3.10 - Éléments d'un bilan hydrique x instrumentation	64
Tableau 3.11 - Comparaison des R^2 obtenus lors du lissage avec différentes équations	67
Tableau 3.12 - Tableau explicatif de la nomenclature de l'instrumentation	75
Tableau 4.1 - Densité moyenne de sols par lysimètre selon le type d'essai	82
Tableau 5.1 - Périodes de non-conformité du fonctionnement des stations Davis.....	102
Tableau 5.2 - Registre des collectes d'échantillons de l'eau pour l'analyse chimique – 2018	115
Tableau 5.3 - Registre des collectes d'échantillons de l'eau pour l'analyse chimique – 2019	115
Tableau 5.4 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L1&L2	115
Tableau 5.5 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L3	116
Tableau 5.6 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L4	116
Tableau 5.7 - Pourcentage du taux de percolation en fonction des précipitations annuelles ..	120
Tableau 8.1 - Résultats de la contamination des sols pour L1&L2	134
Tableau 8.2 - Résultats de la contamination des sols pour L3	135
Tableau 8.3 - Résultats de la contamination des sols pour L4	136

1 Introduction

1.1 Contexte général

Ce mémoire portera les études du départ d'un vaste projet de recherche dans le domaine de la géotechnique environnementale. En ce sens, le chapitre d'introduction fait brièvement la mise en contexte du domaine de la géotechnique environnementale. En plus, la problématique d'ingénierie qui est la motivation de ce projet de recherche est présentée.

1.1.1 Géotechnique environnementale

La géotechnique est la science qui associe les compétences de l'ingénierie civile et de la géologie pour la compréhension du comportement mécanique des sols et son interaction avec les ouvrages. L'apparition de la théorie de mécanique des sols se passe dans les années 30 avec les études de Karl Terzaghi, un ingénieur autrichien considéré actuellement comme le père de l'ingénierie géotechnique.

D'un point de vue pratique, la géotechnique se développe en raison de la nécessité de l'être humain d'adapter l'environnement à ses besoins. Malgré l'avance de la mécanique des sols issue des études de Terzaghi, la société moderne affronte de problèmes environnementaux liés aux sols qui exigent l'évolution des connaissances acquises. Alors, la géotechnique environnementale apparaît comme une étude spécialisée pour apporter des solutions aux inconvénients entraînés, principalement, par les résidus aux sols.

La décontamination du sol et aussi la réduction des émissions des gazes potentielles pour l'effet de serre sont des exemples de l'activité dont la géotechnique environnementale peut être impliquée. Dans ce contexte, la majorité des études du domaine se déroule dans les zones dégradées/contaminées d'anciennes constructions, les sites d'enfouissement de déchets et les parcs à résidus miniers. En effet, ce projet se concentre sur les sites d'enfouissement.

Dans un sens plus technique, la géotechnique environnementale étudie des mécanismes d'interaction entre le sol, les contaminants, les gazes et l'eau. Autrement dit, elle étudie

l'intégration des aspects géotechniques (comme la mise en place; le compactage; etc.) avec le comportement hydraulique non saturé dans les milieux poreux.

1.1.2 Déchets et l'enfouissement technique

Ensuite à la révolution industrielle au dix-neuvième siècle, la société expérimente le développement de nouvelles technologies qui ont occasionné l'agrandissement des villes urbaines. Dans ce contexte, une caractéristique de la société urbaine moderne est la consommation en grande échelle de produits de faible durabilité et jetables. Ce comportement contribue pour la croissance des impacts environnementaux liée à l'augmentation du volume de déchets générés et sa concentration spatiale [Izzo et Nagalli, 2013].

Des estimations réalisées en 2016 constatent que la production globale de déchets a atteint 2,01 milliards de tonnes par année. Des projections statistiques prévoient que cette valeur peut grimper en 70% jusqu'à 2050. L'Amérique du Nord (soit Bermudes, États-Unis et Canada) produit 289 millions de tonnes par année de déchets, ce qui correspond à environ 14% du total mondial. Cette région présente un taux moyen de génération de déchets de 2,21 kg/habitant/jour, le plus élevé du monde [Kaza *et al.*, 2018].

Malgré l'évolution de prise de conscience de la société et les avances du recyclage, la génération de résidus solides est encore une menace due aux dommages potentiels que l'emplacement non adéquat des résidus solides peut provoquer, soit environnementale (pollution de l'air, de l'eau et du sol) soit sanitaire (prolifération d'infirmités).

Au Québec, l'enfouissement est la méthode plus utilisée pour la destination finale des déchets, parce qu'elle est considérée comme efficace et d'aspects économiques favorables. Le progrès de la technologie de gestion des sites d'enfouissement conjointement avec l'imposition de règlements a permis une optimisation de la méthode. Cependant, même avec cette avancée, l'enfouissement présente encore deux préoccupations: la production de gaz et du lixiviat.

Le biogaz d'enfouissement, composé essentiellement de méthane, résulte de la décomposition des matières organiques présentes dans les déchets. La principale inquiétude par rapport le biogaz d'enfouissement est lié aux risques d'incendie et d'explosions, aux dommages des

plantes, aux odeurs désagréables (surtout au milieu urbain), et aux émissions excessives à l'atmosphère, en considérant que le méthane a un potentiel 36 fois plus puissant que le dioxyde de carbone (CO₂) pour l'effet de serre. Néanmoins, actuellement la technologie disponible permet que les biogaz soient captés et utilisés de façon bénéfique. Certains sites les utilisent pour la production de l'électricité ou des autres combustibles de remplacement [Statistique Canada, 2012].

Le lixiviat est un liquide composé par l'eau provenant des sources externes, telles que la précipitation, qui s'infiltré et percole à travers la masse des déchets et s'ajoute aux liquides produits lors de la décomposition biologique des résidus solides. Il est chimiquement composé par des substances organiques et inorganiques, toxiques et nocives pour l'environnement et l'être humain. Habituellement, dans les sites d'enfouissements, le lixiviat est collecté au fond des cellules puis transporté pour le traitement, ou dans certains cas, envoyé directement pour l'élimination.

Le traitement du lixiviat peut être négligé juste pour les cas où la concentration de contaminants est relativement faible, autrement ils doivent être acheminés vers les stations de traitement. La production de lixiviat est indésirable du point de vue environnemental, mais aussi dans un sens économique, si nous prenons en compte que son traitement est coûteux. Dans ce contexte, la réduction des quantités de lixiviat devient prioritaire dans la gestion de sites d'enfouissement. Une solution technique pour cette question est la conception d'un recouvrement (appelée aussi de couverture finale) approprié, capable de limiter l'infiltration par les déchets.

La quantité d'eau qui traverse les déchets est influencée par certains facteurs dont le plus considérable est l'infiltration de précipitations [Sobrinho, 2000]. Selon les lignes directrices sur les sites d'enfouissement technique de déchets dangereux [CCME, 2002], la conception d'un recouvrement doit accomplir des exigences techniques de performance pour : permettre le contrôle et la réduction de l'infiltration de liquides dans une cellule d'enfouissement fermée; favoriser le drainage en surface; résister à l'érosion et à l'abrasion et conserver leur intégrité même sous l'effet du tassement.

1.2 Contexte du projet de recherche

Ce projet de recherche se déroule dans un contexte environnemental dont le problème central est la production excessive de lixiviat observée dans un lieu d'enfouissement technique (LET) géré par l'entreprise privée Waste Management (WM), notre partenaire industriel, qui exploite plusieurs sites d'enfouissement au Canada.

1.2.1 Problématique

St-Nicéphore est un LET situé à Drummondville dans la province du Québec, en activité depuis 1984. Le site a une surface estimée d'environ 75 hectares, divisée en trois zones selon les différentes périodes d'activité : Phase 1 (1984 à 1996); Phase 2 (1996 à 2012); et la Phase 3A (2013 à ce jour). Le décret initial du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) prévoit la fermeture complète du site à la fin 2020.

Actuellement, WM détecte une production importante de lixiviat dans leur site ce qui peut surcharger le système de traitement. Au-delà des coûts élevés pour le traitement de lixiviat, une majoration du système de traitement implique des dépenses supplémentaires pour l'implantation. Alors, réduire la production actuelle de lixiviat devient une solution intéressante pour éviter une éventuelle ampliation du système et pour réduire les coûts de traitement.

Le projet se concentre sur l'ancienne région du site (déjà fermé) qui comprend la zone de la Phase 1 et une portion de la Phase 2. Dans cette région, le recouvrement final a été construit selon les exigences du Règlement sur les déchets solides, maintenant désuet [Q-2, r.13, gouvernement du Québec]. À l'occasion, les exigences réglementaires ne précisaient pas les caractéristiques nécessaires pour le sol employé, surtout du point de vue de la conductivité hydraulique. Donc, le sol utilisé présente une perméabilité élevée qui permet une infiltration substantielle de l'eau de précipitation qui, en conséquence, contribue à l'excès de lixiviat.

D'ailleurs, dans la même région du site cité auparavant, des tassements différentiels sont observés. Les concavités formées par le tassement dérangent le ruissellement de la précipitation vers les systèmes de drainage de l'eau de surface. De cette façon, l'eau s'accumule en forme de flaques qui entraînent une infiltration excessive au fil du temps.

Dans ce contexte, un reprofilage de la couverture existante devient une solution technique viable dans la perspective qu'elle puisse régler le problème des tassements différentiels en utilisant des couches de matériaux (sol) de faible conductivité hydraulique. Ainsi, la surface du terrain devient plus régulière, pour faciliter le ruissellement, et la couverture permet un meilleur contrôle des infiltrations en vue de réduire significativement la production de lixiviat.

En plus, à l'occasion du reprofilage du site, le projet prévoit une étude complémentaire pour atteindre le troisième besoin de WM, soit la valorisation des sols contaminés. Le site de St-Nicéphore reçoit une grande quantité de sols contaminés de différents niveaux de contamination. Malgré l'encouragement du gouvernement pour la valorisation des sols contaminés, certains types (comme ceux de la plage B-C de contamination) ont des restrictions plus grandes. Donc, couramment ils ne sont utilisés que dans la couverture journalière. Il est défavorable du point de vue économique dû au fait que l'enfouissement des sols contaminés occupe un espace dans les cellules qui pourrait être remplacé par les déchets. En plus, son utilisation comme recouvrement final possède un double avantage. Des coûts pour le matériau de construction de la couverture sont éliminés, une fois que le site profite pour recevoir les sols contaminés.

1.2.2 Objectifs du projet de recherche

Globalement, l'objectif du projet de recherche est la validation d'un reprofilage du recouvrement, en valorisant des sols contaminés sans répercussions du point de vue environnemental, de façon qu'il soit capable d'empêcher l'infiltration excessive de l'eau dans le sol en vue de réduire la production de lixiviat. À partir de cet objectif global se dédoublent les objectifs spécifiques liés aux hypothèses de projet. Parmi eux, il faut souligner les suivants :

- L'attestation des lysimètres comme l'outil plus adéquate pour surveiller l'infiltration à travers les recouvrements en LET's;
- La validation de l'applicabilité de la méthode proposée par Parent et al (2006) concernant le design des lysimètres;
- Évaluation de la performance non saturée de plusieurs configurations de recouvrement du plan expérimental;

- La vérification que l'utilisation de sols contaminés comme matériau du recouvrement ne constitue pas une menace pour l'environnement en attestant que la concentration de contaminants dans les eaux de surface ne dépasse pas les limites réglementaires;
- Obtention d'un modèle calibré de prédiction des infiltrations, par le biais des données mesurées in situ et la modélisation en logiciels spécialisés (par l'approche du bilan hydrique).

1.2.3 Objective de la maîtrise

Le projet des lysimètres, dont la prévision de durée est de 3 ans, est conçu pour couvrir différentes études scientifiques du domaine qui seront développées à l'avenir par le groupe de recherche de la géotechnique environnementale de l'Université de Sherbrooke.

Cependant, ce mémoire est émis dans le cadre d'une maîtrise dont l'implication est la conception, l'implantation et le suivi de la première année de projet. Ainsi, une question de recherche proposée pour guider le développement de la maîtrise est l'établissement des objectifs : Comment peut-on planifier, instrumenter, construire des lysimètres et valider la performance des composantes pour atteindre les objectifs du projet de recherche?

Dans ce contexte, les objectifs spécifiques de la maîtrise sont fixés, soit :

- Conception et planification de la construction du plan expérimental;
- Détermination des propriétés physiques et hydrauliques des matériaux utilisés;
- Vérification de la conformité et calibration des instruments;
- Construction des lysimètres et l'application du contrôle de qualité d'exécution;
- Élaboration d'une procédure standard d'opération du plan expérimental
- Validation de la performance des composantes des lysimètres pendant la première année;
- Traitement et interprétation des données initiales fournies par les instruments installés.

1.3 Structure du mémoire

Pour cibler les objectifs spécifiques cités dans le sous-titre antérieur, ce présent mémoire possède la structure suivante :

Le chapitre 2 porte sur l'état de l'art concernant le sujet de sols non saturés, ses concepts géotechniques et les théories reliées. D'ailleurs, une mise en contexte des connaissances de l'utilisation de lysimètres et de la réglementation des sols contaminés au Québec est faite.

Le chapitre 3 se concentre aux activités préalables pour la conception du plan expérimental. Il présente : la localisation du site et ses caractéristiques; la caractérisation des matériaux en laboratoire; le design des lysimètres et la méthode de conception; la validation de conformité et calibration de l'instrumentation utilisée; et les détails de la modélisation numérique.

Le chapitre 4 fait le sommaire de l'étape d'implantation du projet. Il englobe les étapes de construction; le contrôle de qualité des travaux journaliers; et l'opération du plan expérimental ensuite à la construction. D'ailleurs, il fait un retour des problèmes affrontés et les perfectionnements réalisés sur le plan expérimental au long de la première année de projet.

Le chapitre 5 est consacré à l'évaluation de performance du plan expérimental. Une analyse des données acquises est faite pour valider le fonctionnement de l'instrumentation. La vérification de cohérence des données est faite par la comparaison entre les résultats de différents instruments. En plus, une analyse préliminaire de la percolation de terrain et de contamination des eaux de surface est présentée en vue d'observer les tendances liées aux besoins du partenaire.

Le chapitre 6 synthétise les conclusions et recommandations essentielles pour la suite du projet. Il fait une brève récapitulative des activités réalisées, souligne certaines contributions originales observées jusqu'au moment et fournit des suggestions d'actions à implémenter par le groupe de recherche à l'avenir.

2 État de l'art

Ce chapitre présente un aperçu de l'état de connaissances de la littérature qui est la base pour le déroulement du projet : le bilan hydrique d'un site d'enfouissement, les phases d'un sol non saturé et ses interactions, la dynamique hydraulique dans les sols non saturés (suction et teneur en eau) et le phénomène de barrière capillaire.

2.1 Bilan hydrique

Cette méthode est originaire des études de classification climatique faites par le climatologue Charles W. Thornthwaite dans les années 50. C'est une méthode basée sur la conservation de masse qui permet d'estimer la quantité de l'eau entrante et sortante d'un système donné dans un intervalle de temps. Ce bilan hydrique est applicable aux différents systèmes y compris ceux plus complexes comme les bassins versants, ou les plus simples comme une couche de sol. Suivant la finalité de la recherche, la méthode peut être appliquée dans une échelle journalière, hebdomadaire, mensuelle ou annuelle.

L'application de la méthode en sites d'enfouissement a été proposée par Fenn [1975], et ensuite elle est développée par Kmet [1982] pour des estimations de la quantité de lixiviat qui percole par les déchets. En considérant la prémisse de la conservation de la masse, le bilan hydrique d'un site d'enfouissement est basé sur la relation (Équation 2.1) entre cinq éléments, soit : la précipitation; l'évapotranspiration; le ruissellement superficiel; l'emmagasinement de l'eau aux pores du sol et la percolation.

$$PPT = ET + R + EMG + PC \quad \text{Équation 2.1}$$

Soit les termes;

- | | |
|---------------------------|---|
| (PPT) Précipitation : | L'eau provenant de la pluie. Dans le bilan hydrique, elle représente la recharge du système; |
| (ET) Évapotranspiration : | Le processus de transfert des eaux du sol à l'atmosphère, alliant l'évaporation de la surface du sol à la transpiration des plants; |

- (R) Ruissellement : Dans certains cas, l'intensité de la précipitation excède la vitesse d'infiltration dans le sol. De cette façon, l'eau s'accumule en dépressions du terrain. Quand la capacité de rétention de la surface est surmontée, l'eau s'écoule vers le sens de drainage d'inclinaison plus élevé;
- (EMG) Emmagasinement: La capacité du recouvrement de retenir l'eau dans les pores du sol. Cette capacité de rétention du recouvrement dépend des caractéristiques des matériaux de constitution (sols).
- (PC) Percolation : Lors que le recouvrement atteint sa capacité de rétention, l'excès de l'eau infiltré par la surface du terrain percole vers les déchets.

La Figure 2.1 présente un schéma simplifié d'une cellule d'enfouissement avec les composantes d'un bilan hydrique. Il est important de souligner que l'eau de percolation en contact avec les déchets contribue directement à la production du lixiviat.

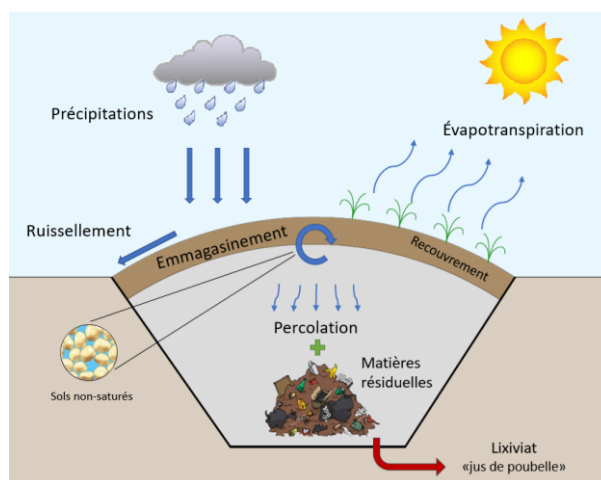


Figure 2.1 - Schéma du bilan hydrique dans une cellule d'enfouissement

Le bilan hydrique exige un système de suivi bien conçu pour obtenir, en grande quantité, des données météorologiques mesurées directement sur le terrain. Les mécanismes de l'interaction entre certains paramètres (par exemple l'emmagasinement et la percolation) possèdent des aspects géotechniques et hydrauliques plus complexes liés aux propriétés non saturées des sols.

2.2 Sols non saturés

Les études de Terzaghi, présentées dans les années 30, sont considérées un monument historique pour la progression de la mécanique des sols classique que nous connaissons actuellement, surtout le principe des contraintes effectives. Néanmoins, ces études prennent comme prémisse que les sols sont un milieu poreux complètement saturé. Cette hypothèse fonctionne pour plusieurs applications d'ingénierie. Cependant, dans certains cas d'analyse (comme la stabilité des pentes naturelles, le transport de contaminants et les infiltrations dans les couvertures de sites d'enfouissement) il est important de considérer les phénomènes liés au comportement non saturé du sol.

L'étude de sols non saturés est plus ancienne dans le domaine de l'agronomie, mais dans l'ingénierie elle se déroule à partir du début de 20^e siècle à travers le développement de concepts et techniques d'essais par certains chercheurs parmi lesquels nous pouvons souligner: Buckingham en 1907, avec la définition du concept de potentiel de l'eau; Haines en 1925 et 1927 présente des études qui indiquent un accroissement de la cohésion des grains du sol selon l'augmentation de la pression négative de l'eau dans les pores; et Richards en 1928, avec la conception de l'équation de flux en sols non saturés [Boszczowski, 2008].

2.2.1 Phases du sol

La phase est définie comme un fragment homogène d'un milieu hétérogène qui est séparé des autres par une limite évidente. Autrement dit, elle est une région de l'espace où les caractéristiques physiques d'un matériau sont uniformes. Dans le sol, qui est un milieu hétérogène poreux, il existe trois phases indépendantes, soit : les solides, représentés par les grains de différents minéraux; l'eau et l'air. Ces deux dernières phases constituent, ensemble, les vides du sol.

Le comportement du sol dépend de la quantité relative de chacune des trois phases. Dans ce contexte, les proportions entre elles sont exprimées par des indices dont la déduction vient de relations entre masse et volume, comme montré par la Figure 2.2. Ces indices sont importants pour l'identification de l'état du sol.

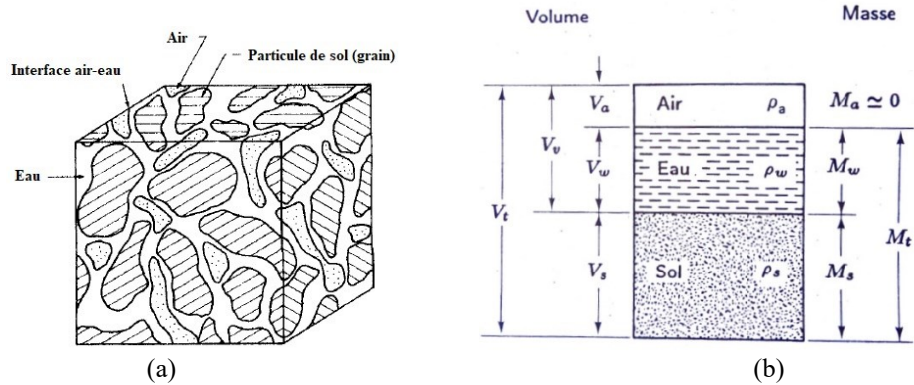


Figure 2.2 - Représentation des phases du sol: (a) élément du sol non saturé [adapté de Fredlund 1993]; (b) diagramme de phases [tiré de Holtz et Kovacs, 1991]

Parmi les indices existants, la porosité n est le rapport entre le volume de vides, V_v et le volume total V_t . Semblable à la porosité, l'indice de vides est défini comme le ratio entre le volume de vides et le volume de solides V_s . Le rapport entre les masses et volumes va définir ce qui est connu comme la densité ou la masse volumique d'un sol, ρ .

Le degré de saturation, S_r , est le rapport entre le volume d'eau, V_w et le volume de vides. Dans les sols saturés, $S_r = 100\%$. Autrement dit, les pores (vides) du sol sont complètement remplis de l'eau, alors, $V_v = V_w$. Plusieurs théories de la mécanique des sols classique considèrent que le sol est un milieu complètement saturé. C'est une hypothèse qui simplifie l'analyse d'une grande quantité de problèmes géotechniques. Cependant, le comportement hydraulique d'un sol est influencé par l'interface air-eau dans les pores, c'est-à-dire que la compréhension des propriétés non saturées exige l'étude des effets entraînés par cette interaction.

2.2.2 Capillarité, succion et teneur en eau

L'analyse du comportement non saturé du sol commence par la compréhension de l'effet de la capillarité. L'eau, quand est un contact avec l'air, possède un comportement différent à l'interface causé pour une propriété dénommée tension superficielle. Cette tension existe en fonction d'une force chimique d'attraction de l'hydrogène de certaines molécules avec l'oxygène des molécules avoisinantes.

Dans ce contexte, les forces d'attraction entre les molécules qui sont à l'interface eau-air sont différentes de celles qui sont à l'intérieur de la masse d'eau. En dessous de la superficie, les

molécules sont entourées par d'autres molécules d'eau dans toutes les directions de sorte qu'elles s'attirent mutuellement avec la même force. Alors, à la surface de l'eau la différence d'attraction entre molécules entraîne une force de contraction du liquide qui lui donne la propriété d'une mince pellicule connue comme membrane capillaire.

Un exemple pour mettre en évidence la capillarité est le comportement de l'eau en tubes capillaires. À cause de la tension superficielle, l'eau dans le tube est forcée à remonter jusqu'à une hauteur capillaire d'équilibre, h_c , en formant un ménisque sphérique à la surface (de rayon, r_n), comme montré par la Figure 2.3. La hauteur d'ascension est inversement proportionnelle au diamètre du tube [Holtz et Kovacs, 1991]. La pression de l'eau juste au-dessous du ménisque est négative, car elle est sous l'état de traction. D'ailleurs, normalement elle est exprimée en mètres de colonne d'eau, et sa valeur est la même de la hauteur capillaire.

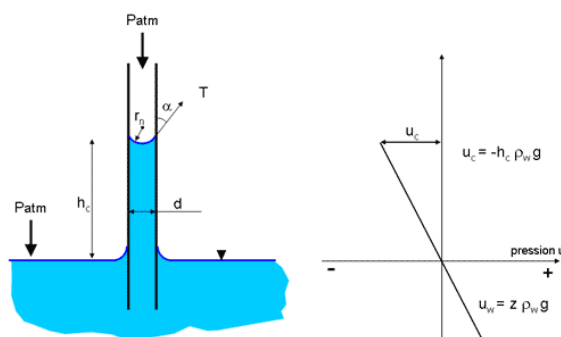


Figure 2.3 - Géométrie d'un ménisque formé par l'action capillaire de l'eau dans un tube [tiré de INPL, 2019]

Pour la plupart des sols, les vides (pores) sont tellement petits qu'ils peuvent être comparables aux tubes capillaires, malgré l'irrégularité entre les grains. L'eau mise en contact avec un sol sec est attirée vers l'intérieur du sol à cause de la tension superficielle. Dans le cas des sols, la hauteur d'ascension d'eau dépend de l'ordre de grandeur des vides (diamètre des pores) qui dépend aussi de la grandeur des grains. Alors, la portion du sol qui est par-dessus de la nappe phréatique contient des pores soumis à une pression négative, en d'autres mots, elle est plus petite que la pression atmosphérique.

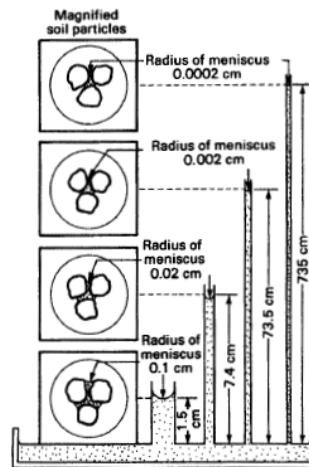


Figure 2.4 - Tubes capillaires montrant les différents rayons de courbure [tiré de Fredlund et Rahardjo, 1993]

Cependant, l'eau dans les pores qui n'a pas de communication avec la nappe phréatique va se placer dans le contact entre les grains du sol en formant des ménisques capillaires, comme le montre la Figure 2.5. La tension superficielle de l'eau (T) entraîne la force (P) d'attraction des particules ce qui augmente la contrainte effective du sol. Cette force d'attraction est connue dans la géotechnique comme succion.

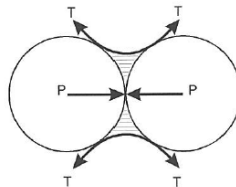


Figure 2.5 - Ménisque capillaire formé dans le contact des grains du sol [tiré de Souza Pinto, 2000]

Selon Boszczowski [2008], la succion totale est un phénomène divisé en deux parties : la succion matricielle et la succion osmotique. La succion matricielle est celle expliquée par le principe de tension capillaire et d'adsorption, liées à la cohésion intermoléculaire à l'interface entre un milieu dense et un autre milieu dans un état différent. C'est un paramètre qui dépend du type de sol, en étant plus fort dans les sols fins que pour ceux qui sont grossiers. La succion osmotique est influencée par la présence d'ions et d'autres solutés de l'eau interstitielle. Lors d'une diminution de la teneur en eau, il y a une augmentation de la concentration de sels ce qui implique l'augmentation de la succion osmotique aussi.

Des essais expérimentaux montrent que pour les niveaux de teneur en eau plus élevés (suctions plus faibles) la succion matricielle devient prépondérante, par contre, la succion osmotique devient plus importante pour les faibles niveaux de teneur en eau (dû à la concentration élevée de solutés).

La quantité d'eau dans les vides du sol varie dans le temps et dans l'espace. Cette quantification de l'eau est exprimée par le paramètre : teneur en eau. La teneur en eau massique est définie comme le ratio entre les masses d'eau (M_w) et des solides (M_s). Cependant, dans le domaine des sols non saturés il est plus courant d'utiliser la teneur en eau volumique pour faciliter les calculs. Elle est le rapport (Équation 2.2) entre les volumes d'eau (V_w) et total (V_t).

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad \text{Équation 2.2}$$

Comme déjà dit, le comportement hydraulique d'un sol est influencé par l'interaction entre les trois phases, surtout l'eau et l'air (considérés comme fluides). Dans les sols non saturés, l'air est adsorbé à l'intérieur des pores lorsque la teneur en eau est relativement élevée. Cependant, pour une faible teneur en eau, l'air est sous une forme plus continue. Il existe donc, un mouvement de l'air à travers l'eau interstitielle qui caractérise un écoulement. L'étude des mécanismes d'un écoulement dans les sols exige la connaissance des lois qui relient le débit avec un potentiel hydraulique [Fredlund et Rahardjo, 1993]. Les prochaines sous-sections présentent les éléments clés pour la compréhension de cette dynamique dans les sols non saturés.

2.2.3 Potentiel hydraulique et loi de Darcy

Le potentiel hydraulique est considéré comme l'énergie de l'eau dans les pores, capable de provoquer un écoulement. Il peut être décrit par de différents éléments, soit : le gradient de teneur en eau; le gradient de succion et surtout le gradient de pression hydraulique. Au-delà du gradient de pression, il y a l'élément dû à la différence d'élévation entre deux points.

Le comportement d'un fluide en mouvement dans un tube a été étudié par le mathématicien néerlandais suisse Daniel Bernoulli, qui a obtenu une équation représentative (Équation 2.3) d'un écoulement permanent d'un fluide incompressible. L'Équation 2.3 peut être étendue pour l'écoulement dans les sols où elle exprime l'énergie totale ou la charge du système dans un point

quelconque du sol. Les termes de l'équation sont considérés comme charges parce qu'ils sont exprimés en fonction de l'unité de longueur. Cela est fait en divisant certains termes par l'accélération gravitationnelle (g).

$$h_w = y + \frac{u_w}{\rho_w g} + \frac{v_w^2}{2g} \quad \text{Équation 2.3}$$

Soit les paramètres :

h_w – charge total du système;

y – charge d'élévation d'un point par rapport à un datum quelconque;

u_w – pression d'eau d'un point au sol;

ρ_w – densité de l'eau;

v_w – vitesse;

$\frac{u_w}{\rho_w g}$ – charge de pression;

$\frac{v_w^2}{2g}$ – charge de vitesse.

La charge de vitesse est relativement faible quand comparée aux autres charges. Alors, il est possible de l'omettre de l'équation [Holtz et Kovacs, 1991].

La charge totale d'un système, formé par la somme des charges d'élévation avec celles de pression, est lié à un potentiel hydraulique fondamental, appelé gradient hydraulique, i . La différence de charge totale entre deux points est dénommée comme la perte de charge, Δh . Dans ce contexte, le gradient hydraulique est défini par le rapport de la perte de charge entre deux points et la respective distance (l) entre eux (Équation 2.4).

$$i = \frac{\partial h_w}{\partial y} = \frac{\Delta h}{l} \quad \text{Équation 2.4}$$

La mécanique des fluides établit deux types d'écoulement possibles, soit : laminaire et turbulent. L'écoulement laminaire est le mode où le fluide se déplace dans la même direction et il se produit en couches parallèles. Cependant, le turbulent est le mode d'écoulement de comportement désordonné, généralement occasionné par des mouvements intenses qui opposent les forces de viscosité pour se déplacer. En effet, l'écoulement est du type laminaire pour la majorité des sols, une fois que la vitesse d'écoulement d'eau est considérablement faible.

En 1856, l'ingénieur français Henry Darcy démontre que lors d'un écoulement laminaire à travers la surface transversale (A) d'une masse de sol, le débit d'eau varie proportionnellement au gradient hydraulique, comme montré par l'Équation 2.5.

$$Q = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} A = -k_w i A \quad \text{Équation 2.5}$$

Le coefficient de proportionnalité (k_w) est appelé coefficient de perméabilité ou conductivité hydraulique dans le cas que le fluide d'écoulement est l'eau. La conductivité hydraulique s'exprime en unités de vitesse puisque le gradient hydraulique (i) est adimensionnel. Le signe négatif de l'Équation 2.5 indique que l'écoulement se passe dans le sens d'une charge hydraulique décroissante [Fredlund et Rahardjo, 1993].

La loi de Darcy est applicable pour les sols saturés et non saturés. Pour les sols saturés, la conductivité hydraulique est considérée comme constante. Cependant, dans les sols non saturés, les pores remplis d'air sont comme des canaux non conducteurs pour l'écoulement de l'eau ce qui fait varier la conductivité hydraulique du sol. Dans ce cas, la conductivité hydraulique est une variable qui dépend principalement de la teneur en eau ou de la succion du sol non saturé.

2.2.4 La courbe de rétention d'eau

La base pour la compréhension du comportement d'un écoulement non saturé est la relation entre la teneur en eau et la succion dans les pores du sol [Parent *et al.*, 2007]. La représentation graphique de ce rapport, dénommé comme courbe de rétention d'eau (CRE) ou courbe caractéristique de succions (en échelle logarithmique), est un modèle conceptuel du comportement hydraulique du sol selon la variation de la teneur en eau volumique. La CRE peut être obtenue par le biais de différentes méthodes de mesure de succion.

La forme de la CRE est influencée, principalement, par la distribution des pores (porométrie) et la compressibilité du sol [Parent *et al.*, 2007]. En plus, elle est influencée indirectement par d'autres facteurs, soit : la teneur en eau initiale, la structure, la minéralogie, l'histoire d'état de contraintes, les macrofissures, le pH du sol, la température, entre autres [McCartney et Zornberg, 2007]. La Figure 2.6 affiche la CRE typique pour différents sols.

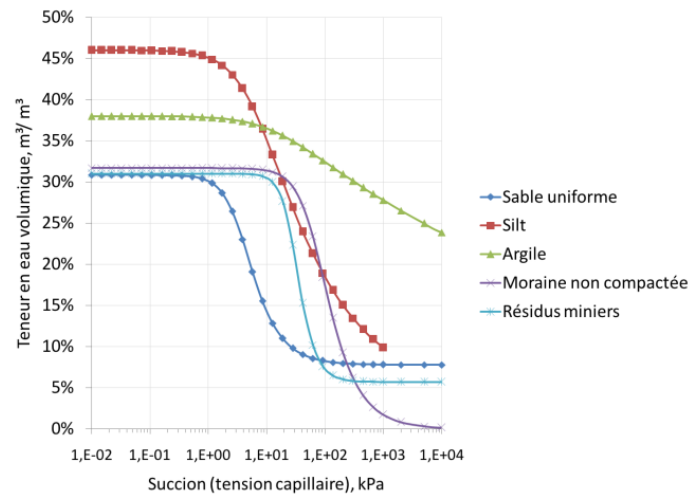


Figure 2.6 - La CRE selon différents des types de sols.

La Figure 2.7 montre que la CRE est une fonction sigmoïdale de trois phases graduelles lesquelles définissent des zones de désaturation. La zone limite d'entrée d'air est la première partie, qui commence du plateau supérieur de la courbe où la valeur de succion est proche de zéro et liée à la teneur en eau saturée θ_s (tous les pores sont remplis d'eau). Le bout de cette zone est délimité par la valeur d'entrée d'air (VEA) qui représente la différence de pression nécessaire, entre l'eau et l'air, pour enlever l'eau du pore plus grand du sol.

La deuxième, la zone de transition, est la phase où débute la perte de saturation du sol de sorte que la diminution de la teneur en eau entraîne une augmentation significative de la succion. Cette zone commence à partir de la VEA et continue jusqu'à la valeur de succion du point de saturation résiduel (dénommé VEE – valeur d'entrée d'eau). Lorsque le point de saturation résiduel est atteint, la phase liquide devient discontinue dans les pores. Alors, l'eau dans les pores est plus difficile à soustraire, malgré l'augmentation de la succion.

La troisième, la zone de saturation résiduelle correspond à la dernière partie de la CRE qui commence du point de saturation résiduel jusqu'à la succion maximale. Dans cette phase, l'augmentation de la succion entraîne peu de variations sur la teneur en eau, dont la valeur a la tendance à θ_r (teneur en eau résiduelle).

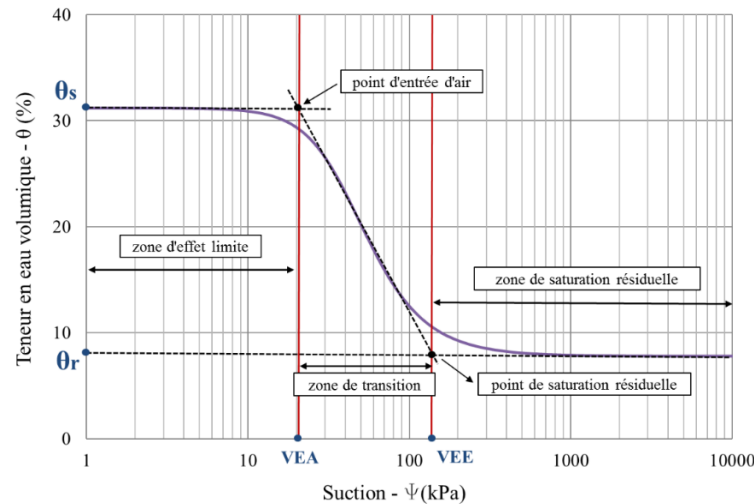


Figure 2.7 - Les zones de saturation de la CRE

La courbe CRE peut être déterminée par différents techniques expérimentaux. En raison de la similarité avec la courbe granulométrique, la littérature présente plusieurs méthodes qui estiment indirectement la CRE à partir de la distribution granulométrique, entre eux : Arya et Paris [1981]; Zhuang *et al.* [2001] et Aubertin *et al.* [2003].

La méthode Arya et Paris [1981] considère que la taille des pores associée à un volume de pores peut être déterminée par l'ajustement de la longueur des pores d'un sol idéal à celui d'un sol naturel. En principe, ce modèle a présenté de bons résultats pour les sols sableux. Pourtant, certains ajustements ont été réalisés par des recherches ultérieures pour l'amélioration des prévisions [Antinoro *et al.*, 2014].

Une façon efficace d'application de ce modèle est la réalisation de différents lissages par étapes. Premièrement, le modèle Fredlund *et al.* [2000] est appliqué pour lisser la courbe granulométrique à partir de données expérimentales. Ensuite, la CRE est générée à l'aide du modèle Arya et Paris [1981], comme décrit par Antinoro *et al.* [2014] et Lacroix Vachon [2008].

Une autre possibilité pour obtenir la CRE est faite par le biais de la classification texturale des sols du US Department of Agriculture (USDA). En effet, en possédant la distribution granulométrique d'un sol il est possible de l'encadrer selon les classes USDA et par la suite obtenir la CRE à partir des sols équivalents de leur banque de données. Il existe des logiciels basés sur des analyses de réseau neuronal, comme Rosetta Lite, qui permettent l'estimation des paramètres de rétention d'eau liés au modèle de lissage de Van Genuchten.

Malgré l'utilisation de méthodes indirectes d'estimation de la CRE par le biais des courbes granulométriques, ceux ne conviennent pas pour tous les matériaux, par exemple les sols plus fins. Dans ce contexte, les méthodes en laboratoire deviennent intéressantes pour l'obtention de la CRE. Le Tableau 2.1 montre quelques méthodes de laboratoire existantes.

Tableau 2.1 - Méthodes de laboratoire pour la détermination de la CRE
[tiré de Smith, K.A. et Mullins, C.E. 2001, p.102]

Method	Approximate range (kPa, suction)	Type of potential measured	Early reference to method
Büchner funnel	0–20	Matric	Haines, 1930
Porous suction plate	0–70	Matric	Loveday, 1974
Sand suction table	0–10	Matric	Stakman et al., 1969
Sand–kaolin suction table	10–50	Matric	Stakman et al., 1969
Porous pressure plate (including Tempe cell)	0–1500	Matric	Richards, 1948 Reginato and van Bavel, 1962
Pressure membrane	10–10,000	Matric	Richards, 1941 Richards, 1949
Centrifuge	10–3000	Matric	Russell and Richards, 1938
Osmosis	30–2500	Matric and osmotic	Zur, 1966 Pritchard, 1969
Consolidation	1–1000	Matric	Croney et al., 1952
Vapor pressure (vacuum desiccator)	3000–1,000,000	Matric and osmotic	Croney et al., 1952
Sorption balance	3000–1,000,000	Matric and osmotic	Wadsworth, 1944
Filter paper	0–10,000	Matric	McQueen and Miller, 1968

En résumé, ces méthodes obtiennent des mesures de succion (ψ) pour différentes valeurs mesurées de teneur en eau (θ), et en conséquence obtenir plusieurs points graphiques représentés par les couples de valeurs (ψ, θ). D'ailleurs, ces mesures peuvent être réalisées directement sur le terrain avec des équipements spécifiques tels que les sondes de teneur en eau et tensiomètres.

Par le biais des points (ψ, θ) obtenus expérimentalement, des modèles mathématiques de lissage sont appliqués pour la détermination de la courbe CRE. Le Tableau 2.2 résume de différents modèles de CRE. Les deux plus utilisés sont : Van Genuchten [1980] et Fredlund et Xing [1994].

Tableau 2.2 - Modèles de lissage de la CRE [adapté de Lacroix Vachon, 2008]

Équations	Auteurs
$S_e = \frac{1}{1 + \alpha\psi^n}$	Gardner [1958]
$S_e = \left(\frac{\psi_{VEA}}{\psi}\right)^n$	Brooks et Corey [1964]
$S_e = \left(\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n}\right)^m$	Van Genuchten [1980]
$S_e = \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n \right]^m$	Fredlund et Xing [1994]

Le paramètre S_e représente la saturation effective. L'Équation 2.6 exprime la définition mathématique en fonction de la teneur eau volumique.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{1 - \theta_r} \quad \text{Équation 2.6}$$

Où S est le degré de saturation; S_r est le degré de saturation résiduel; θ est la teneur en eau volumique et θ_r est la teneur en eau volumique résiduelle. Alors, l'équation de Van Genuchten [1980] peut être réécrite comme présenté par l'équation suivante :

$$\theta(\psi) = \theta_r + \left[\frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\psi)^n)^m} \right] \quad \text{Équation 2.7}$$

Où $\theta(\psi)$ est la teneur en eau en fonction de la succion, ψ ; α est un paramètre d'ajustement relié à la VEA, n est un paramètre d'ajustement relié à la pente de désaturation et m est un paramètre d'ajustement relié à la partie résiduelle de la courbe. Le paramètre m est dépendent de n (où $m=1-1/n$), souvent utilisé en vue de réduire le nombre de paramètres d'ajustement.

De la même façon, l'équation de Fredlund et Xing [1994] peut être réécrite en appliquant l'égalité fournie par l'Équation 2.6 :

$$\theta(\psi) = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha} \right)^n \right] \right\}^m} C(\psi) \quad \text{Équation 2.8}$$

$$C(\psi) = 11 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \quad \text{Équation 2.9}$$

Les paramètres α , n et m sont les équivalents à ceux de Van Genuchten [1980]. Cependant, $C(\psi)$ est un artifice pour forcer la courbe à tendre vers zéro (de la teneur en eau) quand la succion atteint la valeur de 10^6 kPa (valeur théorique). En plus, ψ_r est un paramètre d'ajustement pour la tendance vers zéro dans l'intervalle de 1500 kPa à 3000 kPa de succion.

La CRE est un outil important pour les analyses dans les sols non saturés, surtout pour les études d'infiltration et percolation. La modélisation numérique d'écoulements non saturés a comme donnée d'entrée les paramètres de la courbe CRE, soit pour le cas de régime permanent, soit pour le transitoire. D'ailleurs, la CRE est utilisée pour dériver la fonction de conductivité hydraulique (FCH) aussi nécessaire pour certaines applications, par exemple : la modélisation d'écoulements; l'évaluation de la dispersion des contaminants; les analyses de la stabilité des ouvrages en terre et l'estimation de la capacité de rétention d'eau des sols agricoles.

2.2.5 Fonction de conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est une mesure de la capacité d'eau de s'écouler dans un milieu poreux. Dans les sols non saturés, cette capacité peut varier progressivement selon le degré de saturation présente. Cela veut dire qu'il existe une fonction de conductivité hydraulique (FCH) dépendante de la variation de la saturation du sol, ou de la teneur en eau.

Lors de la diminution de la teneur en eau d'un sol, l'eau existant dans les pores est remplacée par l'air de façon que nous avons une réduction de la surface disponible pour le flux d'eau, et la conductivité hydraulique diminue. Autrement, lorsque la teneur en eau augmente (réduction de

la succion) la conductivité hydraulique augmente graduellement jusqu'à atteindre la limite maximale, la conductivité hydraulique saturée, k_{sat} . Dans ce contexte, la variable indépendante de la fonction pourrait être la teneur en eau. Pourtant, utiliser la succion comme variable indépendante facilite l'interprétation puisque la CRE et la FCH sont à la même échelle.

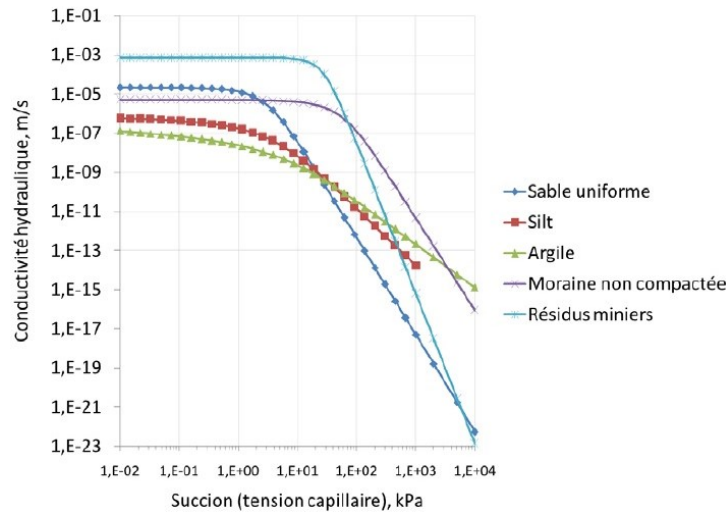


Figure 2.8 - FCH selon différents types de sols.

De façon analogue à la CRE, la FCH est un outil graphique. Elle aide l'interprétation du comportement de la conductivité hydraulique en fonction de la succion. La Figure 2.8 illustre la FCH typique pour sols de différentes granulométries. Les deux axes du graphique sont en échelle logarithmique. Une observation pertinente de la Figure 2.8 est le fait qu'un sol plus grossier soumis à une certaine succion, comme le sable uniforme, devient moins perméable que certains sols plus fins, comme le silt et l'argile. Cela peut arriver dû au fait que dans les sols grossiers les pores perdent la saturation plus rapidement que dans les sols fins. Alors, les pores remplis d'air entravent l'écoulement (faible conductivité hydraulique).

Un autre aspect observé dans la Figure 2.8 est le plateau au début des courbes où la conductivité hydraulique est presque constante (zone de succions plus faibles). Comme déjà dit, cette partie de la courbe correspond au moment où le degré de saturation est de 100%. C'est-à-dire que tous les pores sont remplis d'eau. Donc, la conductivité hydraulique atteint sa valeur maximale k_{sat} . Ainsi que la CRE, le k_{sat} peut être estimé avec modèles mathématiques à partir de la granulométrie. Cependant, les essais de laboratoire sont considérablement plus précis.

Les essais d'obtention de k_{sat} sont d'exécution relativement simple. Pourtant, l'estimation en laboratoire de la conductivité hydraulique d'un sol non saturée est plus complexe et coûteuse. De cette façon, la pratique habituelle est de tracer la FCH à partir de modèles mathématiques (Tableau 2.3) comme ceux présentés dans la sous-section précédente.

Tableau 2.3 - Modèles de lissage de la FCH [adapté de Lacroix Vachon, 2008]

Équations	Auteurs
$k(\psi) = k_{sat}e^{-\alpha\psi}$	Gardner [1958]
$k(\theta) = k_{sat}(S_e)^{3+\frac{2}{n}}$	Burdine [1953] et Brooks et Corey [1964]
$k(S_e) = k_{sat}S_e^q \left(\frac{\int_0^{S_e} \frac{d\Sigma e}{\psi^{1+p}}}{\int_0^1 \frac{d\Sigma e}{\psi^{1+p}}} \right)^2$	Mualem [1976]
$k(\theta) = k_{sat}\sqrt{S_e} [1 - (1 - (S_e)^n)^m]^2$	Van Genuchten [1980] et Mualem [1976]

Le modèle empirique de Gardner [1958] part de la linéarisation de l'équation de Richards qui décrit l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux, homogène et non saturé dont le flux est un régime permanent. Dans les modèles de prévision macroscopiques, la conductivité hydraulique est estimée à partir de la teneur en eau. Généralement, la base théorique arrive à des formulations relativement simples avec un petit nombre de paramètres ajustables. Cependant, ce type de modèle ne considère pas l'influence de la géométrie de pores sur la conductivité hydraulique, dans la majorité des cas.

Par ailleurs, il existe les modèles statistiques qui estiment la conductivité hydraulique en considérant la distribution de la taille des pores du sol. En plus, la formulation considère aussi des facteurs par rapport la variabilité de la tortuosité des pores. Pourtant, une bonne prédiction du comportement de la rétention d'eau est fondamentale pour l'estimation de la FCH, même pour les modèles statistiques. Dans ce contexte, certaines méthodes utilisent la CRE dans les

modèles statistiques de prédiction de la FCH. Alors, un modèle de CRE donné par une expression analytique peut être appliqué dans le modèle de Burdine [1953] ou ce de Mualem [1976] pour l'estimation d'une FCH assez précise. Le côté avantageux de cette combinaison de modèles est qu'ils facilitent la détermination simultanée de tous les paramètres par solution numérique en utilisant des données appropriées tirées d'expériences sur les écoulements transitoires [Durner, 1992].

Actuellement, le modèle plus utilisé d'estimation de la FCH est celui de Van Genuchten [1980] combiné au modèle prédictif de Mualem [1976], présenté par l'Équation 2.10.

$$k(\psi) = k_{sat} \frac{[1 - (\alpha\psi)^{n-1}(11 + (\alpha\psi)^n)^{-m}]^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{ml}} \quad \text{Équation 2.10}$$

Où $k(\psi)$ sont les valeurs de la conductivité hydraulique en fonction de la succion, k_{sat} est la conductivité hydraulique à l'état saturé; ψ est la succion; α , n et m sont les paramètres d'ajustement du modèle de CRE (Équation 2.7) et l est une constante, généralement $l=0.5$.

2.2.6 Profil hydraulique

Un recours graphique utile pour la compréhension de l'écoulement en sols non saturés est le profil de succion par la charge d'élévation. Il est important surtout pour l'analyse de flux dans les lysimètres à tension nulle. La Figure 2.9 présente la détermination d'un profil de succion selon la FCH et un débit spécifique de percolation donné.

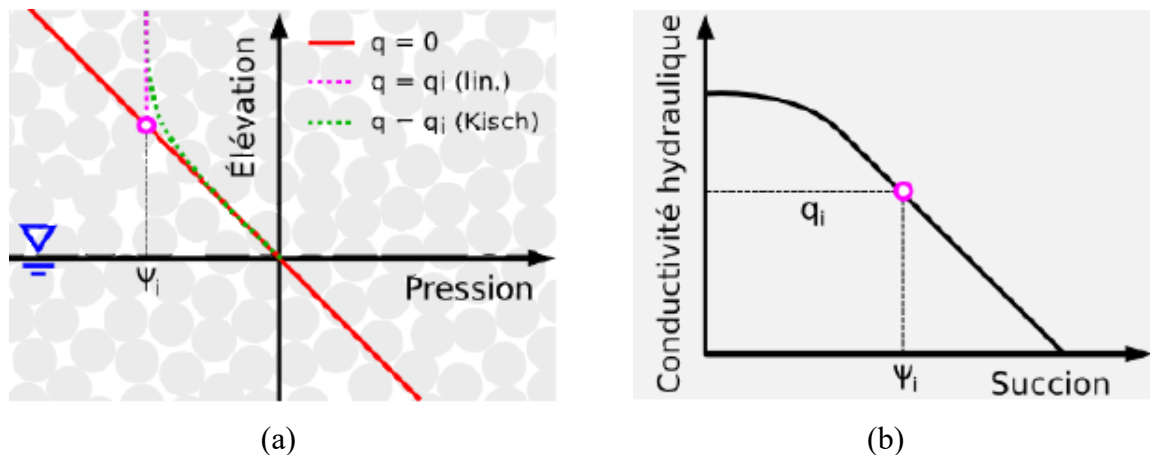


Figure 2.9 - Profil de succion développée en un sol soumise à un écoulement en régime permanent

Ce profil de la variation de la succion avec la charge (mesurée en hauteur) est construit à l'aide de la méthode linéaire. La méthode est appliquée pour les flux en régime permanent.

Selon Parent *et al.* [2006], lors de l'absence d'un flux ($q=0$) qui traverse la couche, le sol est en conditions hydrostatiques au-dessus de la nappe. Alors, la charge de pression (succion en valeur négative) est égale à la charge d'élévation et en conséquence la charge totale est nulle. Graphiquement, cela est représenté (Figure 2.9a) par la courbe continue rouge où la charge varie linéairement à 45 degrés. Cependant, si le sol est traversé par un taux d'infiltration verticale, appelé aussi comme débit spécifique vertical ($q=q_i$), la courbe se détache de la direction à 45 degrés, elle monte verticalement et devient constante avec la hauteur. Dans cette partie verticale de la courbe où la charge de pression est constante, le gradient hydraulique est unitaire et le débit spécifique possède la valeur de la conductivité hydraulique non saturée ($q_i=k_i$).

En résumé, la méthode linéaire permet l'obtention de la succion maximale, ψ_i , du sol soumis à un débit spécifique q_i , sous un gradient unitaire. La valeur de succion ψ_i peut être estimée graphiquement par le biais de la FCH, en projetant la valeur de q_i sur la courbe comme montré par la Figure 2.9b.

La méthode de Kisch [1959] fournit un modèle plus précis pour tracer le profil de succion (Équation 2.11). En revanche, il est numériquement plus complexe que la méthode linéaire.

$$z(\psi) = - \int_0^{\psi} \left(\frac{q}{k(Y)} - 1 \right)^{-1} dY \quad \text{Équation 2.11}$$

Où $z(\psi)$ est l'élévation en fonction de la succion, ψ est la succion, q est le débit spécifique, $k(Y)$ est la FCH et Y est la variable d'intégration représentant ψ .

2.2.7 Barrière capillaire

La barrière capillaire est un phénomène qui se produit lorsqu'un matériau de pores relativement fins est placé sur un matériau de pores plus grossiers. La couche supérieure (de pores fins) a une forte capacité de rétention d'eau et pour cela elle est dénommée comme couche de rétention capillaire (CRC). La couche inférieure (pores grossiers) possède une perméabilité plus grande, en conséquence elle a une faible capacité de rétention. Alors, elle est dénommée comme couche de bris capillaire.

Cet ensemble de deux couches est souvent utilisé comme recouvrement en sites d'enfouissement pour éviter des infiltrations d'eau. Cet effet est généré par la capillarité sur l'interface créée justement par le contraste de conductivité hydraulique entre les deux matériaux (granulométrie et porométrie différente). À cause de la capacité de rétention d'eau, la CRC garde un degré de saturation élevée et en conséquence elle a une succion plus faible. Par ailleurs, la CBC est soumise à une succion plus forte et devient moins perméable que la CRC pour un débit spécifique q , comme montré par la Figure 2.10.

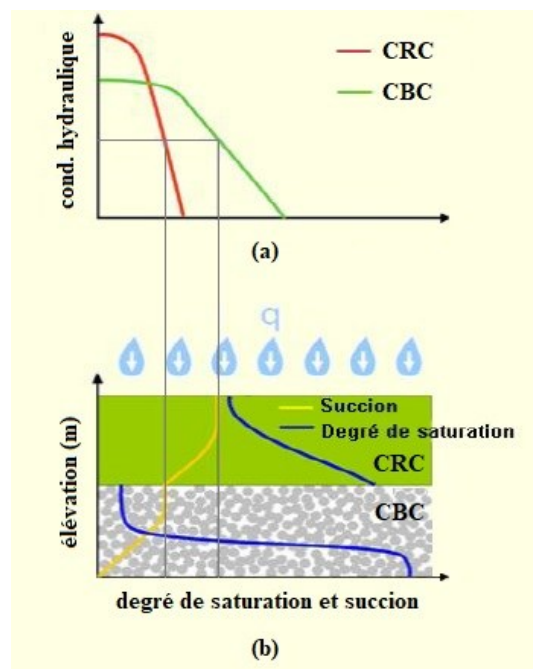


Figure 2.10 - Profil de degré de saturation et de succion dans une CEBC [adapté de Lacroix Vachon, 2008]

Une autre application de la barrière capillaire est utilisée dans les couvertures de résidus miniers réactifs. Étant donné que la CRC maintient une teneur en eau élevée, elle empêche considérablement l'entrée d'oxygène moléculaire vers les résidus miniers.

Cet effet capillaire, quand appliqué en recouvrements, est appelé comme couverture avec effet de barrière capillaire (CEBC). La CEBC possède deux types, soit : (a) la barrière évapotranspirative horizontale et (b) la barrière inclinée utilisée comme drain latéral.

(a) Barrière évapotranspirative horizontale

Ce type de CEBC est souvent utilisé dans les LET, pour le contrôle de l'écoulement de l'eau dans la cellule d'enfouissement. Sa performance est optimisée dans les climats semi-arides/arides. Pendant la période plus humide, elle vise à accumuler le maximum possible de l'eau de précipitation. Cependant, dans les périodes plus sèches l'eau emmagasinée dans la CRC évapore de façon à réduire la percolation vers les déchets.

Dans la littérature il existe des méthodes pour la conception d'une barrière évapotranspirative, que fondamentalement prévoient l'estimation de la capacité nécessaire pour l'emmagasinement d'eau et la détermination de l'épaisseur de la CRC pour atteindre cette capacité. Un des travaux réalisés concernant le sujet a été fait par Khire *et al.* [2000] en climat aride ou semi-aride. Premièrement, ils suggèrent une formulation pour de l'emmagasinement nécessaire, EMG_{requis} , comme présenté par l'Équation 2.12.

$$EMG_{requis} = PPT + \text{Source des neiges} + \text{autres apports} \quad \text{Équation 2.12}$$

Khire *et al.* [2000] considère l'hypothèse d'une CEBC quasi horizontale et qu'elle est utilisée dans une région aride. Dans ce contexte, le ruissellement peut être négligé. Pour un EMG_{requis} important, le ruissellement est considéré comme 10% à 15% de la PPT (précipitation).

À la suite de l'estimation de l'emmagasinement requis vient l'étape de calcul pour la détermination de l'épaisseur de la CRC. Ce calcul est fait par le biais d'une équation de la capacité d'emmagasinement, S_{CRC_0} , en fonction de l'épaisseur de la couche, L_{CRC} .

Morris et Stormont [1999] ont déterminé l'Équation 2.13 à partir de la constatation que le gradient de succion devient unitaire dans la CRC juste avant que l'eau commence à percoler de l'interface entre couches vers la CBC.

$$S_{CRC_0} = \int_0^{L_{CRC}} \theta(z + \psi_B) dz \quad \text{Équation 2.13}$$

Où la fonction $\theta(z + \psi_B)$ est celle de la CRE, z est l'élévation de l'interface entre couches de la CEBC (CRC/CBC) et ψ_B est la succion correspondant à un débit q , comme la méthode présentée à la Figure 2.9, où l'eau commence à entrer dans la CBC.

Pourtant, Khire *et al.* [2000] font un ajout sur l'équation proposée par Morris et Stormont [1999]. Sous les conditions climatiques imposées par l'hypothèse, ils concluent que pendant la saison de croissance des plantes, ceux-là transpirent toute l'eau disponible. Alors, l'évapotranspiration est définie par la valeur du point de flétrissement des plantes multiplié par la profondeur des racines, L_R . Le point de flétrissement est la teneur en eau minimale pour que les plantes vainquent la tension capillaire de l'eau (succion) et puissent prélever l'eau nécessaire à leur croissance. Dans ce contexte, Khire *et al.* [2000] proposent un bilan de la S_{CRC_0} en considérant l'effet de l'évapotranspiration, comme présenté par l'Équation 2.14.

$$S_{CRC_c} = S_{CRC_0} - \theta(\psi_F)L_R \quad \text{Équation 2.14}$$

Où ψ_F est la succion correspondante au point de flétrissement.

Il est donc possible de tracer une courbe de la capacité d'emmagasinement, S_{CRC_c} , en fonction de l'épaisseur, L_{CRC} , et par la suite, déterminer la valeur de L_{CRC} (où $L_{CRC} > L_R$), nécessaire pour une valeur d'emmagasinement requis.

(b) Barrière inclinée

De façon semblable à la barrière horizontale, la CRC d'une barrière inclinée joue le rôle d'accumuler l'eau infiltrée, cependant, avec quelques différences de fonctionnement. L'eau s'infiltré avec un débit q , puis s'accumule aux pores de la CRC et la percole dans le sens d'inclinaison de la barrière sans traverser la CBC. À un certain moment, l'accumulation atteint un débit maximal, Q_{max} , sur un point à partir duquel chaque goutte infiltrée est transférée vers la CBC, comme montrée par la Figure 2.11. Ce point est dénommé comme longueur de transfert.

$$LT = \frac{Q_{max}}{q} \quad \text{Équation 2.15}$$

La conception d'une barrière inclinée implique l'interaction entre plusieurs facteurs, soit : l'inclinaison de la pente, la longueur de la pente, la limite d'épaisseur de la barrière, le taux de percolation admissible pour l'eau qui traverse la barrière vers les déchets, entre autres. Dans ce contexte, le choix des matériaux et ses respectives caractéristiques hydrauliques deviennent fondamentaux, surtout pour assurer une longueur de transfert optimale et adéquate.

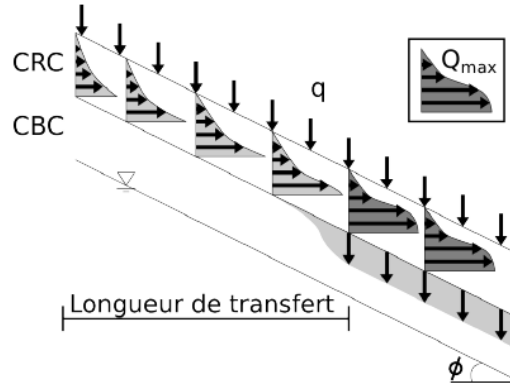


Figure 2.11 - Schéma du comportement de l'écoulement dans une barrière inclinée

À l'équilibre, le débit maximal Q_{max} est calculé par l'Équation 2.16, ce qui graphiquement équivaut à l'aire sous la courbe de vitesses dans la CRC.

$$Q_{max} = \int_{z_{CBC}}^{z_{CRC}} v(z) dz \quad \text{Équation 2.16}$$

La compréhension de cette équation est facilitée si l'analyse est faite à l'échelle de succion. Selon la loi de Darcy, la vitesse d'écoulement dans un sol non saturé est obtenue par la multiplication du gradient hydraulique (i) par la conductivité $k(\psi)$, correspondante à une succion existante. Alors, l'Équation 2.16 peut être réécrite :

$$Q_{max} = \int_{\psi_{cCBC}}^{\psi_{cCRC}} i k(\psi) dz \quad \text{Équation 2.17}$$

Étant donné que Q_{max} peut être calculé en fonction de la succion, tracer le profil de succion devient utile pour l'analyse du phénomène, comme montré par la Figure 2.12.

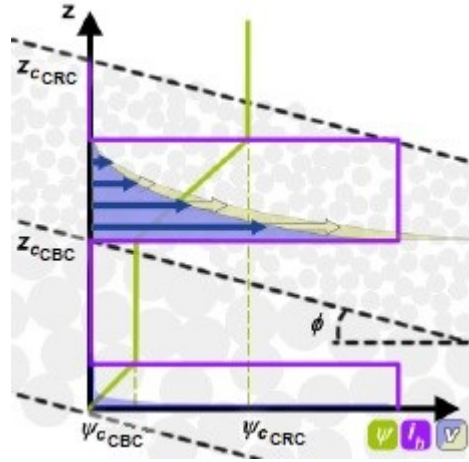


Figure 2.12 - Profil de succion dans une barrière inclinée

Lorsque la succion est variable, le gradient hydraulique horizontal est égal à la tangente de la pente ($i = \tan \phi$) et quand la succion devient constante, il devient nul (alors, il n'y a pas l'écoulement horizontal). Cependant, entre les bornes de l'intégrale le gradient est indépendant de la succion. Dans ce contexte, Ross [1990] propose le calcul selon l'Équation 2.18

$$Q_{max} = \tan(\phi) \int_{\psi_{cCBC}}^{\psi_{cCRC}} k(\psi) dz = k_{sat} \tan(\phi) \int_{\psi_{cCBC}}^{\psi_{cCRC}} k_r(\psi) dz \quad \text{Équation 2.18}$$

Où k_{sat} est la conductivité hydraulique saturée et k_r est la conductivité relative (k/k_{sat}).

Toutefois, le modèle de Ross [1990] présente des limitations. Il considère qu’au long de la longueur de transfert (avant d’atteindre la succion critique), la totalité de l’eau est seulement drainée par la CRC. Parent et Cabral [2006] réalisent des modélisations numériques qui montrent un flux descendant qui se produit progressivement (augmente de manière sigmoïdale avec la distance) vers la CBC dans la partie amont de la barrière capillaire. Autrement dit, la barrière capillaire fuit tout au long de l’interface CRC/CBC. [Abdolazadeh *et al.*, 2011]

Dans ce contexte, Parent et Cabral [2006] proposent une méthodologie basée sur le modèle de Ross [1990] qui estime la percolation dans la CBC. Ils montrent qu’à l’aide de la FCH il est possible à déterminer le débit d’infiltration correspondant à la valeur de succion critique. Ross [1990] considère que le débit critique d’infiltration est atteint lorsque 100% du débit d’infiltration traverse l’interface CRC/ CBC. Pourtant, Parent et Cabral [2006] proposent un ajuste du débit de Ross [1980] au point de la longueur de déviation par le biais de l’Équation 2.19.

$$q_i = 0.998q^{1.024} \quad \text{Équation 2.19}$$

2.3 Lysimètres

Les recouvrements finaux sont souvent utilisés pour le contrôle de l’infiltration de l’eau précipité en sites d’enfouissement. La conception du recouvrement prévoit l’utilisation de matériaux qui lui rendent un comportement moins perméable. Cependant, l’analyse sur le terrain de la performance hydraulique de couvertures n’est pas simple. Dans ce contexte, plusieurs méthodes de suivi d’infiltrations ont été développées. Parmi eux sont les lysimètres.

2.3.1 Développement historique des lysimètres

Le lysimètre est une méthode de mesure directe, appliquée depuis la fin du 17^e siècle, pour estimer les recharges de l’eau souterraine [Mijares *et al.*, 2011]. Malgré l’existence de plusieurs types, le plus utilisé est le lysimètre à tension nulle. En résumé, le lysimètre à tension nulle est un conteneur enfoui dans le sol, placé à une certaine profondeur pour capter et permettre la comptabilisation de l’eau infiltrée [Parent *et al.*, 2006]

Les premiers lysimètres avaient un design habituellement cylindrique avec une surface ouverte d'environ 1m^2 [Mijares *et al.*, 2011]. Ils étaient conçus en négligeant l'influence de la géométrie sur sa performance. Bews *et al.* [1997] montrent que la présence du lysimètre enfoui dans le sol peut entraîner des changements aux conditions limite et en conséquence, modifient la représentativité de la réalité du site. D'ailleurs, l'étude remarque que le design du lysimètre doit intégrer des aspects liés à sa géométrie; les propriétés hydrauliques du sol (non saturées) et le flux dans la base, pour assurer la même condition limite, soit à l'extérieur ou à l'intérieur du lysimètre, et ainsi minimiser les erreurs de mesure.

Dans ce contexte, Benson *et al.* [2001] présentent le projet Alternative Cover Assessment Program (ACAP) où la conception d'un lysimètre de grandes dimensions (10x20m) est proposée. Selon Benson *et al.* [1994], une surface de captation plus grande serait plus représentative étant donné qu'il comprend davantage les hétérogénéités du site. D'ailleurs, un lysimètre de surface insuffisante peut provoquer une déviation latérale d'écoulement, en sous-estimant la mesure d'infiltration d'environ 3mm/année. En d'autres mots, l'eau infiltrée passe préférentiellement à l'extérieur du lysimètre au lieu d'avoir un écoulement plus homogène.

À partir des études faites en laboratoire, Chiu et Shackelford [2000] indiquent que l'estimation des lysimètres est plus précise lorsque le rapport entre la largeur du lysimètre, W , soit au moins 5 fois plus grande que la hauteur de la couche barrière, D , en dessus de la bouche du lysimètre Figure 2.13. Il faut noter que l'absence des parois dans les lysimètres peut aussi entraîner le même problème de déviation.

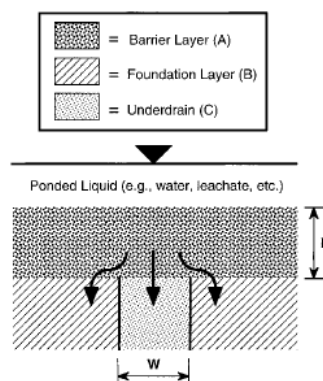


Figure 2.13 - Profil schématique d'un écoulement latéral aux lysimètres [Adapté de Chiu et Shackelford, 2000]

Benson et al [2001] remarquent un autre aspect pertinent est lié à la barrière causée par le fond du lysimètre. En effet, son fond fermé empêche le flux vertical (ascendant ou descendant) des liquides écoulés, ce qui diffère du cas réel où il n'y a pas des barrières physiques comme telles. Alors, le projet ACAP a été conçu pour réduire les désavantages du lysimètre. La hauteur des parois, par exemple, suit la même épaisseur de la couche de couverture jusqu'à la surface, justement pour éviter de possibles déviations des infiltrations. Le lysimètre utilisé au projet ACAP a été capable de fournir des mesures d'écoulement avec une précision entre 0,00004 à 0,5 mm/année. Malgré le progrès obtenu par le projet ACAP, certains détails devaient être étudiés pour raffiner la méthode de design de lysimètres. Des rendements de collecte inférieurs à 10% ont été constatés pour les lysimètres à tension nulle [Zhu *et al.*, 2002] en raison d'une dérivation d'écoulement.

2.3.2 Conception selon Parent et al [2006]

À partir de l'état de connaissances existant, Parent *et al.* [2006] présentent une étude pour évaluer la performance de lysimètres dont le design considère les paramètres non saturés du sol, comme le profil de succion et la FCH. À l'aide de modélisations numériques, Parent et al [2006] vérifient qu'en fonction de la hauteur des parois il est possible d'éviter différences de gradients de pression internes et externes du lysimètre (B_{int} et B_{ext} dans la Figure 2.14). De cette façon, l'eau n'est pas déviée.

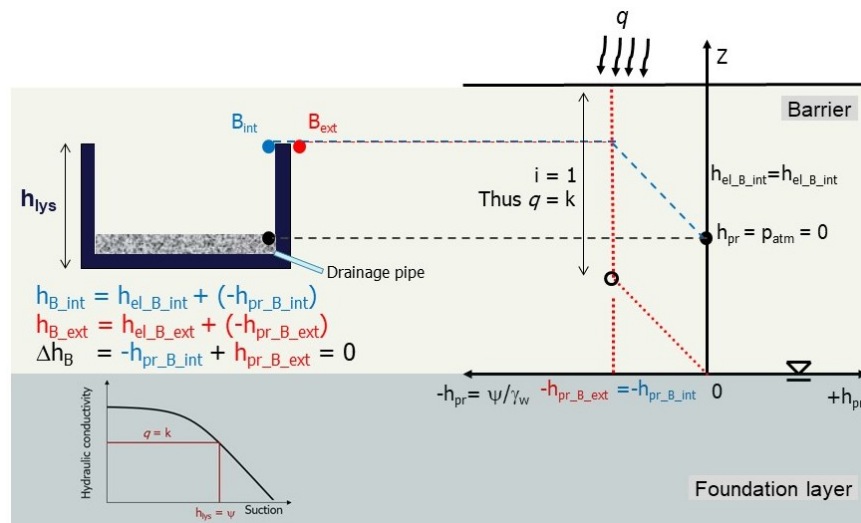


Figure 2.14 - Principe de conception des lysimètres [tiré de Cabral et al, 2019]

Selon Parent et al. [2006], pour un débit spécifique d'infiltration, q , il n'existe pas de différence de charge totale entre l'intérieur et l'extérieur du lysimètre ($\Delta H_b = 0$) lorsque le profil de succion est presque vertical à la hauteur de la bouche du lysimètre (le gradient hydraulique devient unitaire et $k = q$; Figure 2.14). Pour ce faire, la hauteur du lysimètre doit être au moins égale à la colonne d'eau associée à une valeur de succion obtenue à l'intersection de la FCH du matériau et du débit spécifique q . Le lysimètre fonctionne s'il est conçu avec une hauteur appropriée, sauf pour les cas d'existence de macrofissures qui peuvent créer un écoulement préférentiel. En plus, le matériau de remplissage doit être identique au matériau de couverture et compacté à la même densité pour garantir que la FCH est égale, soit à l'intérieur ou à l'extérieur du lysimètre.

2.4 Sols contaminés au Québec

Les sols contaminés constituent une menace d'action directe sur les ressources hydrologiques et aussi sur la qualité de l'air. La conséquence immédiate est l'apparition des problèmes sévères pour la santé publique et pour l'environnement. L'absence d'une réglementation adéquate concernant les terrains potentiellement contaminés par des activités humaines (commerciaux, industrielles, etc.) implique une mauvaise classification et gestion des sols contaminés.

2.4.1 Historique du Règlement québécois

À partir d'inquiétudes par rapport la dégradation du milieu naturel au Québec, en 1972 le gouvernement prend de mesures pour la protection de l'environnement en créant la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE). Quelques années plus tard, en décembre 1984, le Ministère de l'Environnement liste un inventaire de 317 sites contaminés à être réhabilités. À cette fin, la Politique de réhabilitation des terrains contaminés est conçue en 1988. Ce document a été accompagné de guides pour décrire les directives de caractérisation et d'interventions nécessaires pour la réhabilitation des sites contaminés.

En 1998, cette politique est remplacée par la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés, pour inclure des aspects de prévention au-delà de la récupération. Depuis 1998, pour assurer une bonne connaissance de la gestion des terrains contaminés, plusieurs règlements ont été développés, parmi lesquels nous pouvons souligner : le Règlement

sur l'enfouissement des sols contaminés, le Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains, Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés.

2.4.2 Critères de contamination

Selon les critères génériques pour les sols, établis par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC,] sont prévus trois niveaux de critères génériques pour plusieurs substances contaminants. Les niveaux (A, B, C) peuvent être définis comme suit :

- Niveau A: Teneurs de fond pour les paramètres inorganiques et limite de quantification pour les paramètres organiques. La limite de quantification est définie comme la concentration minimale qui peut être quantifiée à l'aide d'une méthode d'analyse avec une fiabilité définie.
- Niveau B: Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle, récréative et institutionnelle (hôpitaux, les écoles et les garderies). Sont également inclus les terrains à vocation commerciale situés dans un secteur résidentiel. Les usages récréatifs moins sensibles comme les pistes cyclables peuvent être associés au niveau C.
- Niveau C: Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation commerciale, non situés dans un secteur résidentiel, et pour des terrains à usage industriel. Les sols contaminés au-dessus du critère générique lié aux niveaux (A, B ou C) doivent être excavés et gérés de façon sécuritaire, ou faire l'objet d'un traitement jusqu'à ce que la concentration des sols soit inférieure à la valeur du critère générique. Dans certains cas, avant de procéder à la décontamination il faut vérifier si les niveaux de décontamination projetés sont suffisants ou s'il est nécessaire de faire d'autres interventions.

En vue de favoriser le développement durable, la législation et la réglementation québécoises permettent la valorisation des certains sols excavés ou traités, selon leur niveau de contamination. Dans certains cas, les sols contaminés peuvent remplacer des matériaux propres pour contribuer à la réduction de la consommation de ces derniers et les coûts associés. L'utilisation varie selon le niveau de contamination du matériau. Cependant, l'usage choisi ne devrait pas favoriser la concentration de contaminants dans l'environnement. Donc, il est

nécessaire l'évaluation des propriétés physico-chimiques des contaminants et l'éventuelle interaction avec le milieu où les sols contaminés seront valorisés.

Concernant la valorisation des sols contaminés au site d'enfouissements, le Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT), établis certaines règles d'utilisation (chapitre Q-2, r. 37). Les sols dans la plage A-B (valeurs limites de l'annexe I du RPRT) peuvent être utilisés, sans restriction, comme matériau de recouvrement journalier ou final dans un lieu d'enfouissement technique (LET). Dans les sites d'enfouissement en tranchée, ils peuvent être valorisés comme matériau de recouvrement hebdomadaire ou final. Cependant, pour les sols caractérisés dans la plage B-C, l'utilisation est conditionnée par les concentrations de composés organiques volatils qui doivent être égales ou inférieures aux critères B (l'annexe I du RPRT). Les sols de contamination plus grande que le critère C (l'annexe II du RPRT), ne peuvent être valorisés que des matériaux de recouvrement journalier.

3 Activités avant construction

Ce chapitre concerne à l'étape de design du plan expérimental et les activités de laboratoire nécessaires pour l'implantation du projet. Il est important à souligner que toutes les activités décrites dans ce chapitre ont été réalisées directement pour moi et ma collègue Virginie Simard, étudiante de maîtrise du même groupe de recherche. Des sections suivantes présentent : la localisation du plan expérimental et la respective stratigraphie ; la caractérisation des matériaux (sols) étudiés ; le rôle de chaque lysimètre ; la méthode de conception de la hauteur de parois de chaque lysimètre et l'instrumentation utilisée pour l'acquisition de données d'analyse et pour le suivi du comportement global du plan expérimental.

3.1 Localisation du plan expérimental

Comme déjà cité dans l'introduction de ce mémoire, le site de St-Nicéphore est un LET situé à la ville de Drummondville, QC. L'opération d'enfouissement est réalisée depuis 1984 et la prévision de fermeture est la fin de 2020. La surface totale du site est de 75 hectares. La zone d'étude qui est objet du projet de recherche est celle indiquée dans la Figure 3.1(b). Cette zone est une partie du site déjà fermé dont la couverture finale a été construite selon l'ancienne réglementation [Q-2, r.13, gouvernement du Québec]. Elle possède une surface d'environ 37 hectares qui englobe la Phase 1 et une portion de la Phase 2.

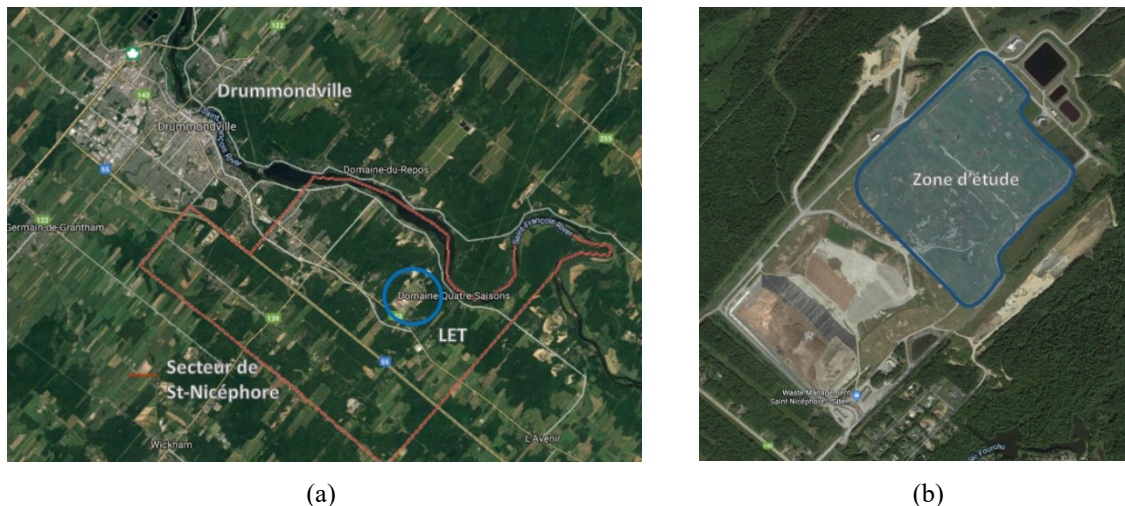


Figure 3.1 - Localisation du site [tiré de Google Maps 2019-09-14]

3.2 Profil typique du terrain

L'étape préliminaire de conception du plan expérimental exige la connaissance de la stratigraphie de la couverture et la composition des sols rencontrés sur place. Dans ce but, des 5 puits d'observation (test pit) ont été excavés en différents points de la zone d'étude.

Les points TP2, TP3 et TP4 (Figure 3.3) ont été faits dans la région considérée la plus appropriée (due à des aspects logistiques de construction et suivi) pour l'implantation des lysimètres. Malgré l'emplacement des lysimètres vers le fond du terrain (devant la station de traitement), la région objet de la recherche est plus étendue (Figure 3.1.b). De cette façon, les puits TP1 et TP5 ont été prévus pour compléter la prospection du site.

Le résultat indique une épaisseur totale de la couverture qui varie entre 2.4 et 3,7 mètres au-dessus des déchets. Cette couverture est fondamentalement composée par une couche drainante sableuse, une couche de granulométrie plus fine et une mince couche de surface avec terre végétale (Figure 3.2). En raison des tassements différentiels qui se sont produits dans cette région, les épaisseurs des couches peuvent varier d'un point à l'autre. Alors, le Tableau 3.1 présente les épaisseurs des couches de la couverture pour chaque puits d'observation.

Tableau 3.1 - Épaisseur des couches de la couverture sur place

Test pit	Épaisseur (m)			Total (m)
	Sable	Sol fin	Terre végétale	
TP1	0.61	1.83	0.30	2.74
TP2	0.61	1.83	0.23	2.67
TP3	0.30	1.83	0.30	2.44
TP4	0.61	1.83	0.15	2.59
TP5	0.61	2.44	0.61	3.66

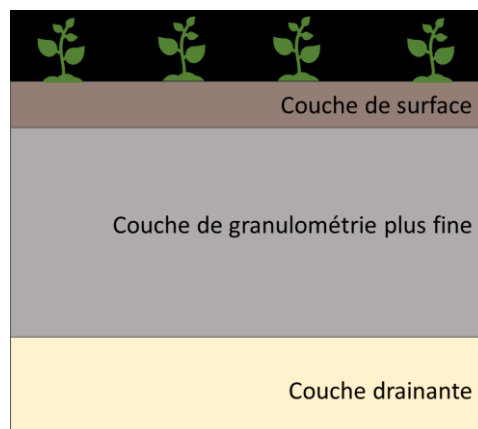


Figure 3.2 - Stratigraphie typique de la couverture au-dessus des déchets



Figure 3.3 - Emplacement des puits d'observation

3.3 Caractérisation des sols

La caractérisation géotechnique des sols est une des conditions préalables pour la conception des lysimètres proposée dans la sous-section 3.4 de ce mémoire. La présente section se concentre sur l'exposition de la méthodologie et les résultats des essais de laboratoire pour la détermination de la granulométrie et la classification des sols, ainsi que les tests d'estimation du comportement hydraulique d'eux, soient les CRE et FCH.

3.3.1 Distribution granulométrique

L'étape préliminaire de l'étude du sol est l'échantillonnage de certains types de sols largement disponibles sur le site pour la caractérisation en laboratoire. Les sols choisis comprennent le sol typique de la couverture, ainsi que les sols contaminés de la plage de contamination AB et BC dont l'utilisation fait partie des objectifs de la recherche comme décrits à l'introduction (sous-section 1.2.2). Avec la nomenclature adoptée au Québec; les sols AB peuvent être utilisés comme matériau de construction, alors que les sols de contamination BC ne peuvent être utilisés que comme couverture quotidienne; ou simplement enfoui. La nomenclature de projet de ces sols est respectivement : recouvrement, sol AB et sol BC.

En fonction des aspects de construction et fonctionnement, une couche de drainage est prévue pour être placée au fond du lysimètre. Cet élément de drainage est composé par une couche de gravier de 0,10 m d'épaisseur au fond, surmonté d'une couche de sable de 0,10 m. Alors que la couche de gravier sert de drain, la couche de sable joue le rôle de filtre pour empêcher le colmatage causé par les particules plus fines des lysimètres. Il faut souligner que le sable est provenant de carrières de la région de l'Avenir. La validation de la loi des filtres de la couche de drainage est présentée dans Rapport de Construction (document interne élaboré par notre groupe de recherche).

Les courbes de distribution granulométrique sont obtenues selon les normes BNQ 2501-025/2013 [Bureau de Normalisation du Québec, 2013]. L'essai est constitué par l'ensemble des étapes de : tamisage et sédimentation. La première étape, le tamisage, est faite par le fractionnement du sol sur des tamis ayant de différentes ouvertures (entre 80mm à 80µm). Pour les particules plus fines que 80µm, il est prévu l'étape de sédimentation. Cette partie du test est basée sur la loi de Stokes et réalisée à l'aide d'un hydromètre. Par le biais des mesures de la vitesse de chute des particules en suspension dans l'hydromètre, il est possible d'estimer la distribution granulométrique de la partie fine (silts et argiles). Un préalable pour cette étape est la connaissance de la densité des particules solides. L'obtention de la densité des solides (D_s) est basée sur la norme BNQ 2501-070/2014 [Bureau de normalisation du Québec, 1986].

Le résultat de l'essai de granulométrie pour les sols de projet est présenté par la Figure 3.4.

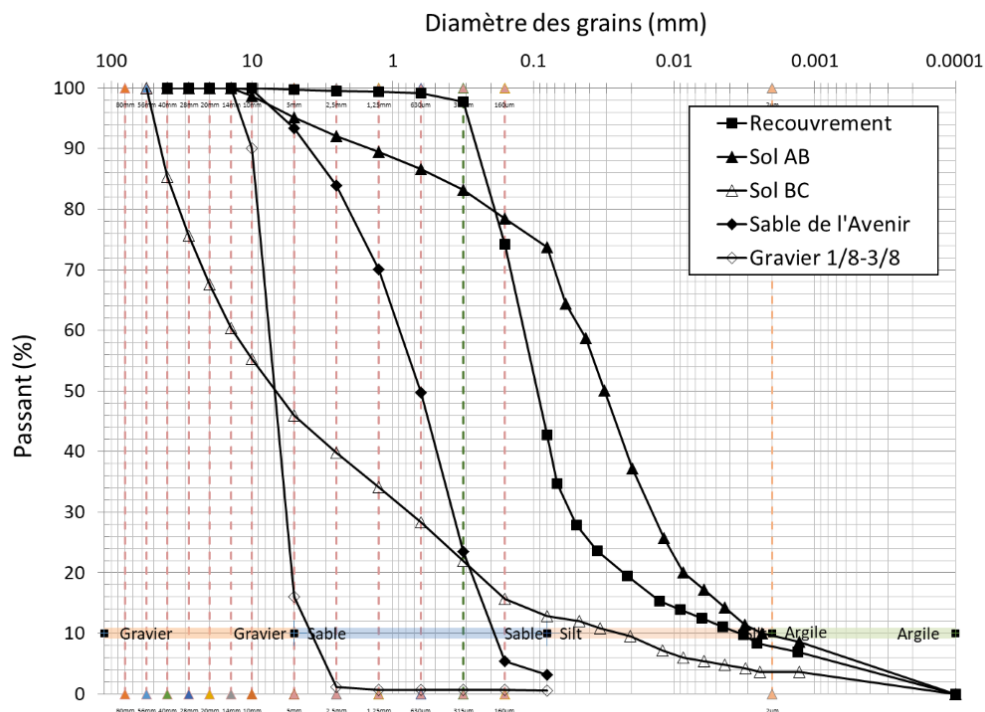


Figure 3.4 - Courbes granulométriques des sols de construction du plan expérimental

3.3.2 Classification et nomenclature des sols

La désignation standard basée sur la distribution granulométrique est celle adoptée dans ce projet. Autrement dit, la classification est faite en fonction de la proportion de chaque gamme de grosseurs des grains (gravier, sable, silt et argile). Le Tableau 3.2 présente la classification des sols testés pour l'utilisation sur le plan expérimental.

Tableau 3.2 - Densité des grains solides (D_s) et classification des sols selon leur granulométrie

Nom du sol	Densité des particules solides (D_s)	Nomenclature	
		Proportion des types sols	USDA
Recouvrement	2,70	Sable silteux	Sandy loam
Sol AB	2,74	Silt sableux	Silt loam
Sol BC	2,77	Gravier sableux	-

En plus, le Tableau 3.2 montre l'utilisation d'une deuxième nomenclature, soit la classification de l'United States Department of Agriculture (USDA). Cette classification est incluse en fonction de l'étape de modélisation numérique prévue dans le projet. Le logiciel utilisé pour ce but (sous-section 3.4.3.1) utilise des paramètres qui font référence à USDA. En plus, l'essai de Mini Disk (sous-section 3.3.3.1) pour l'estimation de la conductivité saturée des sols est basé aussi sur cette classification.

En effet, l'USDA est une classification hiérarchique qui regroupe les sols de textures semblables en 12 catégories plus générales. De façon semblable à la classification standard, elle est basée sur la proportion des types de sols, soient : sable, silt et gravier. L'outil souvent utilisé pour la classification USDA est dénommé comme triangle de classification de texture. Le triangle est divisé en zones relatives aux 12 catégories établies par USDA (voir Figure 3.5).

Il faut remarquer que la méthode du triangle de texture de l'USDA n'est pas applicable aux fragments de roche ou les sols organiques. Ces types de sols nécessitent d'autres approches.

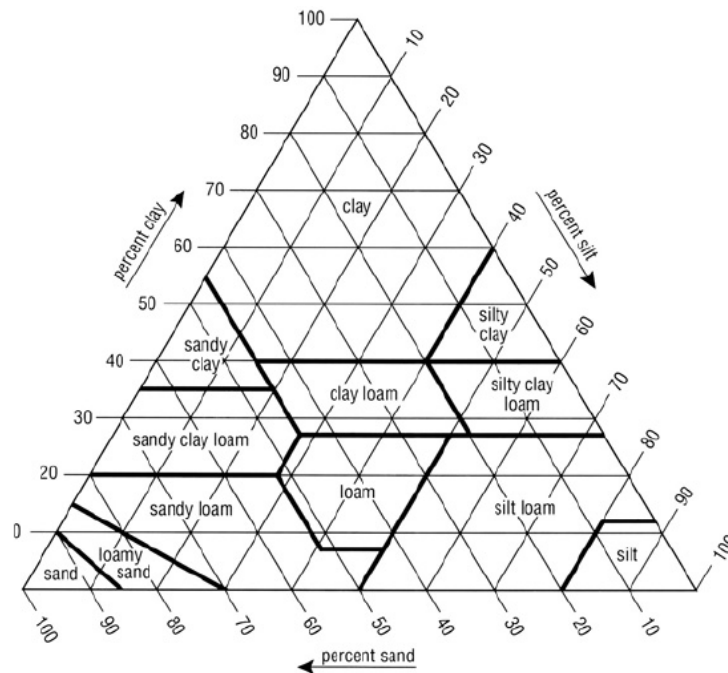


Figure 3.5 - Triangle USDA de classification de texture [Soil Survey Division Staff 1993]

3.3.3 Conductivité hydraulique saturée

La connaissance de la conductivité hydraulique saturée est essentielle pour la compréhension du comportement hydraulique du sol. Dans ce contexte, deux types d'essais sont réalisés pour l'obtention de la valeur de k_{sat} des sols utilisés lors de la construction du plan expérimental. Par la suite, les deux types d'essais sont présentés, ainsi que les résultats et la comparaison entre eux.

3.3.3.1 Infiltromètre Mini Disk

L'infiltromètre à minidisque est un instrument fabriqué par Decagon Devices Inc. (entreprise du groupe METER), qui permet l'estimation de la conductivité hydraulique saturée, k_{sat} d'échantillons de sols. Il est un instrument d'utilisation simple et pratique, souvent utilisé pour les mesures directement sur le terrain. Il est également pratique pour l'utilisation en laboratoire ce qui est le cas de ce projet de recherche.

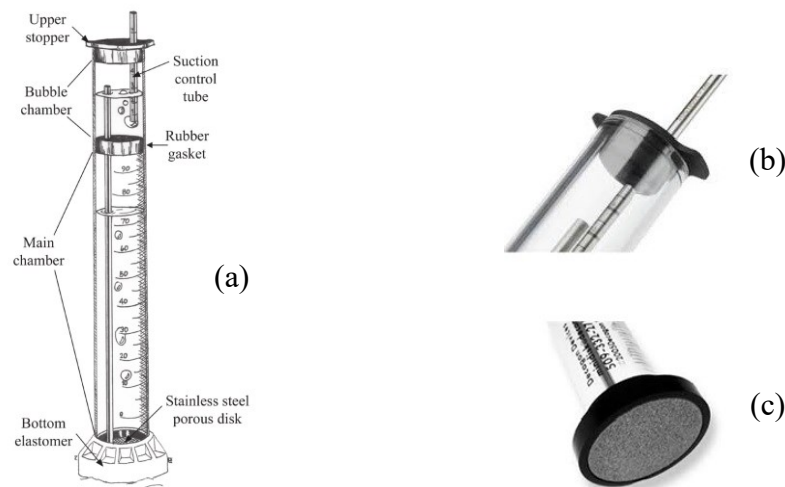


Figure 3.6 - Infiltromètre Mini Disk [(a) tiré de Decagon,2005; (b et c) tiré de Meter Environnement, 2017]

Le Mini Disk est constitué de deux réservoirs (Figure 3.6), un supérieur (bubble chamber) et une autre inférieure (main chamber). Tous les deux réservoirs sont remplis d'eau. Le supérieur (Figure 3.6.b) est le responsable par le mécanisme de contrôle de succion. Le réservoir inférieur contient le volume d'eau qui s'infiltre dans le sol à un taux déterminé par la succion sélectionnée. Le fond du Mini Disk (Figure 3.6.c) est doté d'un disque poreux en acier inoxydable qu'évite la

sortie de l'eau à l'air libre. Lorsque le fond touche une surface relativement plane de sol, l'eau peut commencer à s'infiltrer.

Dans cet essai, le k_{sat} est estimé à l'aide de la méthode proposée par Zhang [1997], qui consiste à mesurer l'infiltration cumulative en fonction du temps et à adapter les résultats à la fonction. Les détails de la méthode de calcul sont rencontrés sur le manuel de l'équipement.

En résumé, le volume d'eau (en ml) dans le réservoir inférieur est mesuré à chaque intervalle fixe de temps par le biais des graduations de l'instrument. L'intervalle de temps est choisi en fonction de la vitesse d'infiltration (qui varie selon la granulométrie du sol et la succion établie). La base de données finale est simple: les temps et les respectives lectures de volume. Les calculs sont faits automatiquement dans un chiffrier Excel fourni avec l'équipement. Les données d'entrée du fichier sont : les lectures, la succion choisie et le type de sol.

3.3.3.2 Perméamètre KSAT Meter

L'équipement KSAT (Figure 3.7.a) est un instrument fabriqué par METER Group AG, aussi utilisé pour l'estimation de k_{sat} du sol. L'équipement fonctionne comme un perméamètre à parois rigide (PPR) dont les mesures sont basées sur l'équation de Darcy. Il peut réaliser des essais soit à la charge constante ou variable.



Figure 3.7 – Perméamètre KSAT Meter [tiré de Meter Group AG, 2017]

Un échantillon de sol moulé dans un anneau métallique est totalement saturé (en eau). Ensuite, l'eau dégazée (température ambiante) est percolé perpendiculairement à sa section. Le débit de percolation et le gradient hydraulique sont mesurés. Le K_{sat} est calculé à partir de l'équation :

$$k_{sat} = \frac{LV}{HAt} \quad \text{Équation 3.1}$$

Où V est le débit volumétrique d'eau; L est la longueur de l'échantillon, H est la hauteur de colonne d'eau, A est la surface de l'échantillon de sol, t est le temps du test. La Figure 3.7(b) présente le schéma de fonctionnement de l'équipement. La burette graduée est fermée par une valve, puis elle est remplie avec le fluide de percolation (l'eau) jusqu'à la hauteur de colonne d'eau qui entraîne le gradient hydraulique initial désiré. Pour les sols granulaires, la hauteur recommandée par le fabricant est $H=5\text{cm}$. Lors du début de l'essai, la valve est ouverte pour libérer l'écoulement de l'eau par l'échantillon. L'excédent d'eau qui sort par la surface supérieure de l'échantillon est drainé par un tube et éliminé ultérieurement.

3.3.3.3 Résultats et comparaison des méthodes

L'objectif de l'exécution des deux types d'essais (3.3.3.1 et 3.3.3.2) est d'avoir une redondance de résultats. Les sols du projet sont testés en considérant le minimum de 3 échantillons pour chaque type d'essai. Les valeurs présentes par le

Tableau 3.3 sont les moyennes estimées pour chaque type de sol.

Tableau 3.3 - Valeurs de la conductivité hydraulique pour les sols du plan expérimental

Sol		Cond. hydraulique	
		Mini Disk	KSAT Meter
		(m/s)	(m/s)
Recouvrement	Sable silteux	2,18E-05	2,34E-05
Sol AB	Silt sableux	2,60E-06	4,75E-06
Sol BC	Gravier sableux	Tamisé à 56 mm	9,55E-06
		Tamisé à 5 mm	1,74E-05
Sable de l'Avenir	Sable	4,35E-04	1,82E-04

Le sol BC a une particularité liée à sa granulométrie qui entraîne des limitations pour les essais. En effet, ce sol en état naturel est constitué par de grosses pierres qui peuvent avoir 100mm de diamètre. En laboratoire, l'anneau utilisé pour les deux types de tests ne comporte pas la granulométrie naturelle du sol BC, étant donné qu'il a 80 mm de diamètre et 50 mm de hauteur.

Alors, pour le cas du Mini Disk l'anneau est remplacé par un moule Proctor pour permettre l'essai du sol tamisé au moins à 56mm, ce qui serait plus représentatif de la réalité de terrain.

Dans le cas du KSAT Meter, le changement de moule est physiquement impossible en fonction des restrictions de l'équipement. Donc, le sol BC est tamisé à 5 mm. Pour avoir une comparaison entre les deux essais, des tests avec le Mini Disk sont aussi réalisés pour le sol BC tamisé à 5mm comme présenté par le Tableau 3.3.

Le premier aspect à remarquer est la similarité de résultats entre les deux types d'essais. Autrement dit, l'ordre de grandeur de k_{sat} demeure la même pour un même type de sol. Les valeurs obtenues par le KSAT Meter indiquent une conductivité hydraulique légèrement plus élevée que celles obtenues par le Mini Disk, dans la majorité des sols testés. Le sable de l'Avenir est l'exemption. Cependant, du point de vue du comportement hydraulique des sols, cette petite différence entre les essais n'est pas significative.

Un autre aspect à analyser est la cohérence des résultats avec la littérature. Le Tableau 3.4 présente des valeurs typiques de k_{sat} pour certains types de sols, proposées par le German Standard Institute (DIN).

Tableau 3.4 - Valeurs de conductivités hydrauliques pour les aquifères non consolidés (DIN18130)

Type de sol	Conductivité hydraulique
Gravier pur	10^{-1} à 10^{-2} m/s
Sable grossier	Approx. 10^{-3} m/s
Sable moyen	10^{-3} à 10^{-4} m/s
Sable fin	10^{-4} à 10^{-5} m/s
Sable silteux	10^{-5} à 10^{-7} m/s
Silt argileux	10^{-6} à 10^{-9} m/s
Argile	$< 10^{-9}$ m/s

En regardant la classification granulométrique des sols utilisés au projet, il est observé une cohérence entre les tests et les valeurs de k_{sat} du tableau. Cependant, le sol BC est une exemption.

Étant donné que sa granulométrie est d'un gravier sableux, la conductivité attendue serait de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m/s plutôt que la valeur d'environ 10^{-5} m/s (d'un sable fin) estimé par les essais. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le sol BC a une courbe granulométrique étalée (bien graduée) comme montrée par la Figure 3.4.

En plus, comme complément de l'étude de la conductivité saturée, il est possible de classer les sols du projet selon leur perméabilité (Tableau 3.5 et Tableau 3.6).

Tableau 3.5 - Classes de perméabilité à l'eau [adaptée de DIN 18130]

Classification	Conductivité hydraulique
Excessivement perméable	$> 10^{-2}$ m/s
Très perméable	10^{-2} à 10^{-4} m/s
Perméable	10^{-4} à 10^{-6} m/s
Légèrement perméable	10^{-6} à 10^{-8} m/s
Faible perméabilité	$< 10^{-8}$ m/s

Tableau 3.6 - Classification des sols utilisés au plan expérimental selon le niveau de perméabilité

Type de sol	Classification
Recouvrement	Perméable
Sols AB	Perméable / légèrement perméable
Sol BC	Perméable
Sable de l'Avenir	Très perméable

3.3.4 CRE et FCH

Comme souligné au Chapitre 2 de ce mémoire, l'hypothèse que les sols sont 100% saturés est une simplification applicable à certains types d'analyses de la géotechnique. Pourtant, pour l'étude d'écoulements, il est impératif la connaissance du comportement hydraulique des sols non saturés. Dans ce contexte, les deux éléments fondamentaux sont la CRE et FCH. Cette sous-

section concerne aux essais de laboratoire et analyses réalisés pour l'obtention des paramètres non saturés du sol.

3.3.4.1 Hydraulic Property Analyser

Le HYDraulic PROPerTy Analyser (HYPROP) est un système automatisé de mesure et d'évaluation des propriétés hydrauliques des échantillons de sol (Figure 3.8.a), fabriqué par METER Group AG. Cet équipement a été conçu à partir de la méthode d'évaporation de Schindler *et al.* [2010], qui est une simplification de la méthode de Wind [1966]. Les détails de la théorie sont présentés sur le manuel de l'équipement.

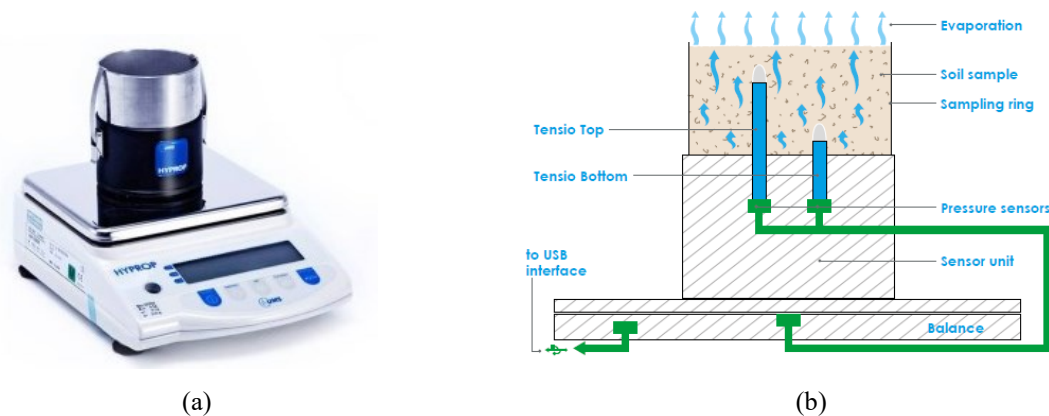


Figure 3.8 - Système HYPROP [tiré de Meter Group AG, 2015]

En résumé, HYPROP permet la détermination de la courbe de rétention d'eau des sols par le biais de mesures de succion et teneur en eau. La Figure 3.8(b) montre le schéma des tensiomètres positionnés à deux niveaux différents pour la mesure de la succion. La teneur en eau est obtenue est calculée en fonction de la perte de poids de l'échantillon dont la mesure est faite automatiquement par la balance du système.

À cette fin, l'échantillon doit être saturé au début de l'essai. Le temps de saturation varie selon le type de sol. Dans ce projet, le temps de saturation établi est de 24 heures (minimum). À la fin du test, l'échantillon est mis au four (24 heures) pour l'obtention de la masse sèche. Cette étape sert à l'ajustement de la teneur en eau initial.

L'ensemble d'instruments est connecté au logiciel HYPROP VIEW pour l'acquisition des données qui seront traitées ultérieurement sur l'autre logiciel dénommé HYPROP FIT pour la détermination de la CRE.

3.3.4.2 Fichier de lissage des paramètres non saturés

Le HYPROP a le rôle de fournir les mesures traitées de teneurs en eau et succion qui permettent d'obtenir uniquement des points correspondants à la CRE de l'échantillon. Pourtant, l'estimation de paramètres non saturés du sol passe par le lissage de la CRE selon un modèle déterminé. Dans ce projet, un fichier Excel est programmé pour le lissage basé sur le modèle Van Genuchten [1980].

Les paramètres d'entrée du fichier sont : les mesures de teneur en eau et succion fournies par HYPROP; la teneur en eau saturée, θ_{sat} , (première valeur de teneur en eau mesurée); et la teneur en eau résiduelle, θ_{res} , déterminé à l'œil selon les points graphiques. Une capture d'écran est disponible dans l'Annexe 8.1 pour exemplifier l'interface du fichier Excel.

À l'aide de la fonction SOLVEUR de l'Excel, une régression de la CRE est réalisée pour qu'elle soit mieux ajustée aux points mesurés par HYPROP. De cette façon, les paramètres de Van Genuchten (α , n et m) sont déterminés par un processus interactif. Une fois estimés, les paramètres permettent la détermination de la CRE au complet.

Comme démontré au Chapitre 2 (sous-sections 2.2.4 et 2.2.5), dans le modèle de Van Genuchten, la FCH est dérivée de la CRE. Dans ce contexte le fichier Excel utilise pour le lissage de la CRE est également capable de tracer la FHC, étant donné que les paramètres sont les mêmes. Pour compléter l'information, un dernier donné d'entrée doit être fourni, soit le k_{sat} obtenu par les essais déjà présentés dans la sous-section 3.3.3.

3.3.4.3 Graphiques CRE et FCH

Le test HYPROP ainsi que le lissage des courbes sont réalisés pour les trois principaux sols utilisés sur le plan expérimental, soit : le recouvrement, sol AB, et sol BC du projet. De la même façon que pour les essais de la conductivité hydraulique saturée, trois échantillons de chaque

type de matériau sont testés. Les Figure 3.9 et Figure 3.10 présentent respectivement la CRE et FCH des sols de ce projet de recherche.

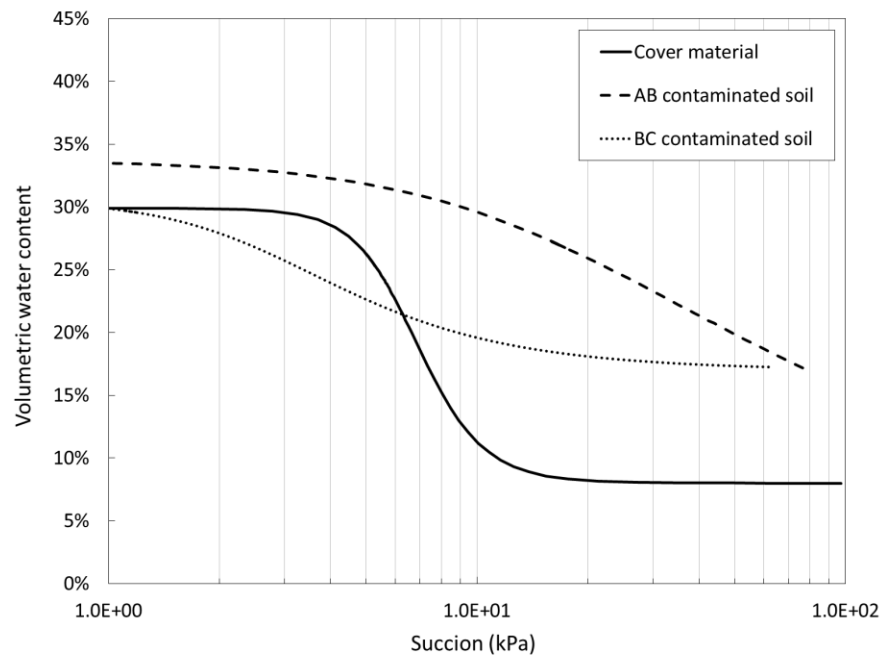


Figure 3.9 - CRE représentative de chaque type de sol du projet

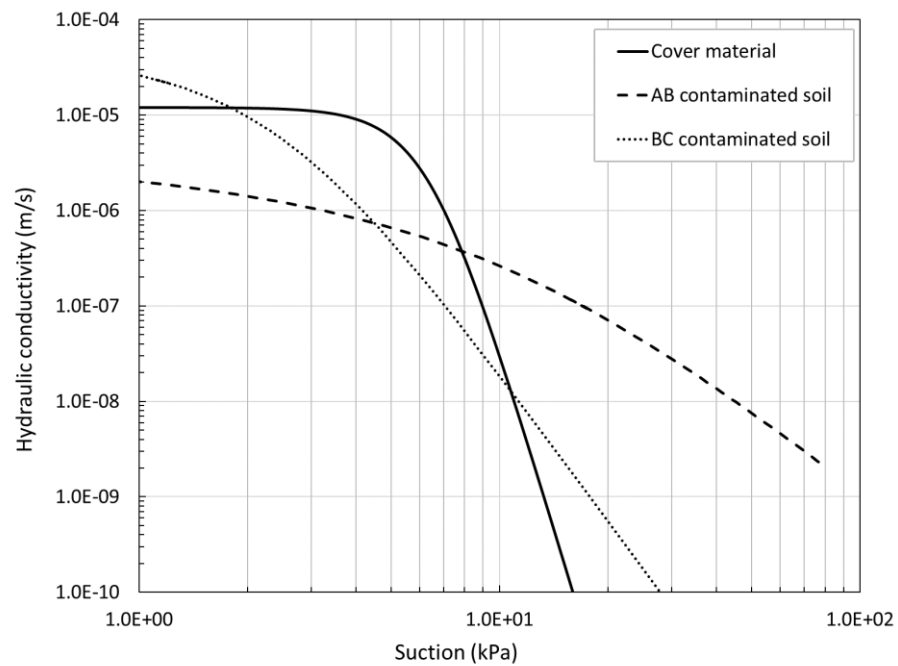


Figure 3.10 - FHC représentative de chaque type de sol du projet

Le test du sol BC présente la même particularité mentionnée sur la sous-section 3.3.3.3 concernant la granulométrie. Le moule d'échantillonnage de HYPROP est le même utilisé pour l'essai KSAT Meter. Alors, en fonction de restrictions d'exécution, le sol BC est tamisé à 5mm pour la réalisation du test HYPROP. Évidemment, cela peut entraîner des différences de résultat par rapport la CRE et FHC du sol BC en état naturel.

Pour la contre-vérification du résultat, une deuxième approche est appliquée au sol BC. Arya *et al.*[1999] proposent une estimation de la CRE à partir de la distribution granulométrique. La méthode consiste à utiliser la courbe granulométrique obtenue en laboratoire et la lisser par le biais du modèle de Fredlund *et al.* [2000]. Ensuite, le modèle Arya *et al.*[1999] permet l'obtention de quelques points de la CRE. De la même façon que pour le cas de HYPROP, il est possible lisser les points tracés par Arya *et al.*[1999] selon le modèle Van Genuchten [1980]. Dernièrement, les paramètres sont aussi utilisés pour l'estimation de la FCH. La Figure 3.11 montre la comparaison entre le résultat obtenu par HYPROP et celui lissé par Arya et al [1999].

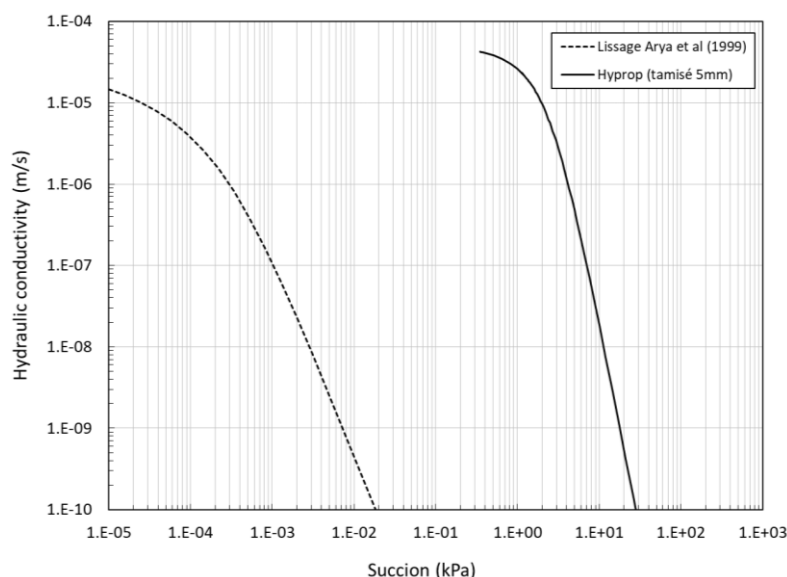


Figure 3.11 - FCH du sol BC obtenue par deux différentes approches

Il faut remarquer que la différence de résultat est significative. Dans ce contexte, il est suggéré pour les prochains travaux du groupe de recherche l'utilisation d'une troisième approche, soit corriger la CRE du sol BC obtenue par HYPROP (tamisé à 5 mm) selon le pourcentage de gravier du sol en état naturel [voir Khaleel et Relyea, 1997]

3.3.4.4 Paramètres Van Genuchten

La modélisation numérique de sols non saturés exige les paramètres hydrauliques du sol comme donné d'entrée. Alors, le Tableau 3.7 présente les valeurs des paramètres concernant les sols du projet qui peuvent être utilisés lors de l'étape de modélisation prévue dans le projet de recherche.

Tableau 3.7 - Valeurs des paramètres hydrauliques du sol obtenus en laboratoire [lissé par Van Genuchten, 1980]

Sol	Classification USDA	α (1/cm)	n -	θ_s (%)	θ_r (%)	K_{sat} (cm/j)
Recouvrement	Sandy loam	0,016	5,23	30,0	8,0	202,18
Sol AB	Silt loam	0,007	1,39	34,0	0,0	41,04
Sol BC (tamisé à 5mm)	Loamy sand	0,037	2,26	31,0	0,17	425,95

Pour comparer les valeurs rencontrées avec ceux disponibles dans la littérature, le Tableau 3.8 présente les valeurs typiques selon la classification USDA. Il est observé que pour les trois sols les résultats ont une différence significative. Cependant les paramètres qui seront utilisés pour le projet sont ceux obtenus par les essais en laboratoire. La validation par comparaison n'est pas possible, mais la fiabilité de l'instrument permet cette décision.

Tableau 3.8 - Valeurs typiques des paramètres pour les sols (USDA) selon [Carsel and Parrish, 1988]

Classification USDA	α (1/cm)	n -	θ_s (%)	θ_r (%)	K_{sat} (cm/j)
Sandy loam	0,075	1.89	41,0	6,5	106,1
Silt loam	0,020	1,41	45,0	6,6	10,80
Loamy sand	0,124	2,28	41,0	5,7	350,2

3.4 Conception des lysimètres

Ensuite à la prospection du terrain et l'étude des matériaux, l'étape suivante est la conception du plan expérimental. Les lysimètres sont conçus en vue d'atteindre tous les objectifs établis pour le projet (sous-section 1.2.2). Cette section concerne aux détails de cette conception, soit : le rôle de chaque lysimètre; la détermination des hauteurs de parois, et le design final des couches.

3.4.1 Fonction de chaque lysimètre

Comme cité auparavant, le point de départ du projet est l'idéalisation d'un plan expérimental qui atteigne les objectifs de recherche et qui répond aux besoins du partenaire industriel WM. Dans ce but, il est prévu la construction de 4 lysimètres remplis avec différentes configurations de sols. Chaque lysimètre a un rôle spécifique pour répondre les questions scientifiques.

- Lysimètre 1 (L1)

Ce lysimètre est considéré comme le contrôle du projet. Il est rempli avec le sol dénommé « recouvrement » ou en anglais, « cover material ». Le recouvrement a été choisi puisqu'il est un type de sol souvent utilisé comme couverture à St-Nicéphore. La conception du L1 est faite également à celle adoptée dans le projet ACAP [Albright et Benson, 2002] où les parois atteignent la surface de la couverture testée. En conséquence, le problème de déviation de flux, entraîné par des différences de valeurs de succion à la bouche du lysimètre, est évité.

- Lysimètre 2 (L2)

Le L2 est aussi rempli avec le recouvrement. Sa conception suit une adaptation de la méthodologie proposée par Parent et al. [2006] en vue de la tester sur le terrain et la peaufiner.

- Lysimètre 3 (L3)

Ce lysimètre est rempli avec le sol BC. C'est la première documentation au Québec sur son utilisation comme matériau de couverture final. Si les études concluent que l'utilisation de sols contaminés n'affecte pas la qualité des eaux de surface, l'utilisation bénéfique de sol BC fournir des avantages économiques significatifs (voir sous-section 1.2.1). En plus, la hauteur de parois suit aussi la méthodologie de conception de Parent et al. [2006].

- Lysimètre 4 (L4)

Le lysimètre 4 est rempli de sol AB. Le site reçoit des quantités importantes de sols à grains fins avec le niveau de contamination dans la plage A-B. Leur utilisation technique comme couverture évapotranspirative pourrait aider à réduire les infiltrations dans les sites d'enfouissement et à réduire les coûts de construction. Ainsi que pour L2 et L3, la hauteur de parois suit la méthode de Parent et al. [2006].

3.4.2 Dimensionnement et concept du plan expérimental

Cette sous-section met au point le raisonnement entrepris pour le dimensionnement des lysimètres et pour l'élaboration de mécanismes qui rendent le plan expérimental fonctionnel.

3.4.2.1 Détermination du débit q de projet

Les lysimètres L2, L3 et L4 sont conçus selon la méthode Parent et al. [2006]. La sous-section (2.3.2) démontre qu'un des éléments préalables pour la détermination de la hauteur de parois est le débit spécifique, q (où taux de percolation). Pour ce projet, la valeur de q est estimée par une simplification du bilan hydrique typique. En effet, l'hypothèse est que le débit q est la différence entre la précipitation et l'évapotranspiration (l'emmagasinement et le ruissellement sont négligés) dans une période de temps représentative.

Les données météorologiques utilisées proviennent d'Environnement et Ressources naturelles du Canada. La station météorologique spécifique est située à Saint-Germain-de-Grantham, la station la plus proche du plan expérimental. La période représentative choisie est de 2013 à 2015. Les valeurs de précipitation sont prises telles quelles. L'évapotranspiration est calculée à l'aide de la méthode de Penman-Monteith [Penman, 1948]. Pour la période représentative utilisée, la valeur estimée de q est approximativement de $1.0\text{E-}8$ m/s (voir détails à l'Annexe 8.4 p.10).

3.4.2.2 Estimation de la hauteur des lysimètres

À l'aide de la FCH des sols il est possible à calculer les hauteurs de parois en fonction du débit spécifique q estimé (Figure 3.12), étant donné qu'il est possible de transformer les mesures de

succion (kPa) à l'équivalent en hauteur de colonne d'eau (kPa/9.81 m/s). Le Tableau 3.9 présente les hauteurs estimées selon la méthode Parent et al [2006].

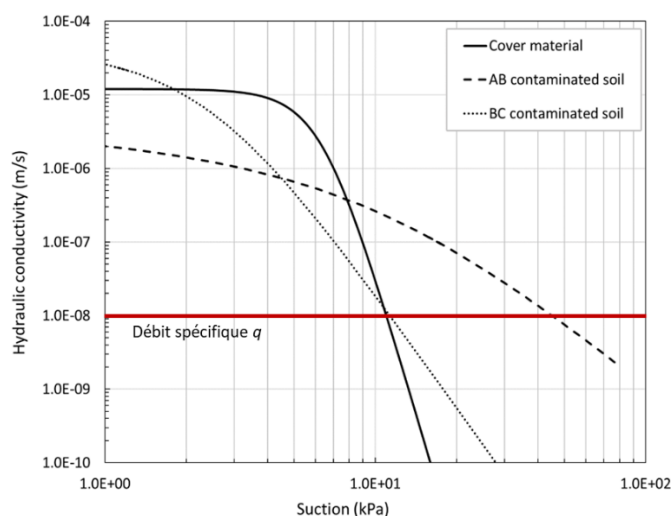


Figure 3.12 - Détermination graphique (FCH) de la hauteur des lysimètres

Tableau 3.9 - Valeurs des hauteurs potentielles des parois des lysimètres

Sol	Hauteur totale (m)
Recouvrement	1,30
Sol AB	2,61
Sol BC	1,30

Il faut remarquer que pour la hauteur finale des lysimètres il faut considérer l'ajout de l'épaisseur de la couche drainante de gravier et sable (au fond du lysimètre).

3.4.2.3 Cellule Typique

Il est prévu la construction des lysimètres dans des cellules qui simulent la réalité de la couverture d'un site d'enfouissement et qui permettent la collecte de l'eau de ruissellement, ainsi que des percolations récupérées au fond des lysimètres. La Figure 3.13 montre le schéma d'une cellule typique des lysimètres et les différents éléments de contrôle.

La surface de la cellule et le fond de l'excavation suivent une pente de 2%. Les eaux sont collectées sur la face en aval de la cellule. Les drains, de surface et du fond, sont reliés à un

réservoir équipé avec un compteur basculant responsable de la comptabilisation de l'eau dans le temps.

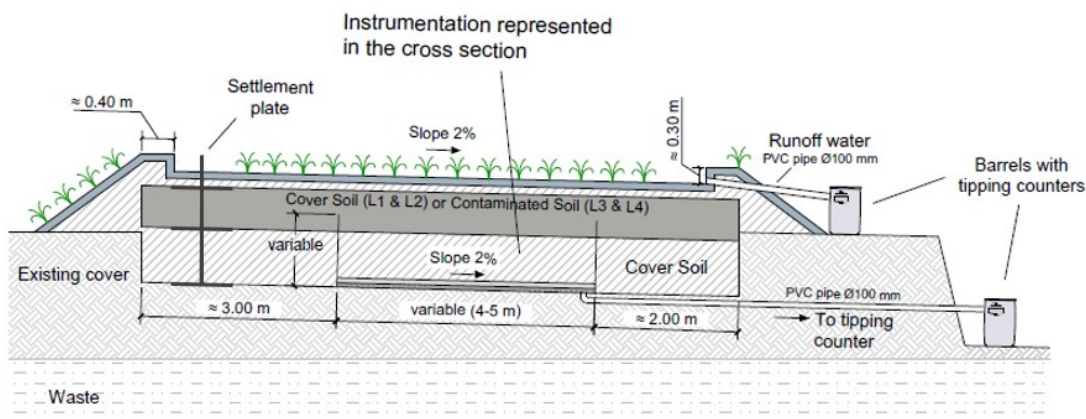


Figure 3.13 - Cellule typique des lysimètres

Il faut souligner que les lysimètres 1 et 2 sont conçus pour occuper la même cellule, étant donné qu'ils sont remplis exactement avec le même matériau (recouvrement). L'idée est de comparer L2 [adaptation de Parent et al 2006] avec L1, une fois qu'il est le lysimètre de contrôle. Dans la même cellule, les deux lysimètres auraient les mêmes conditions hydrauliques. La Figure 3.14 montre la vue en plan des cellules et les tuyaux de drainage et collecte des eaux.

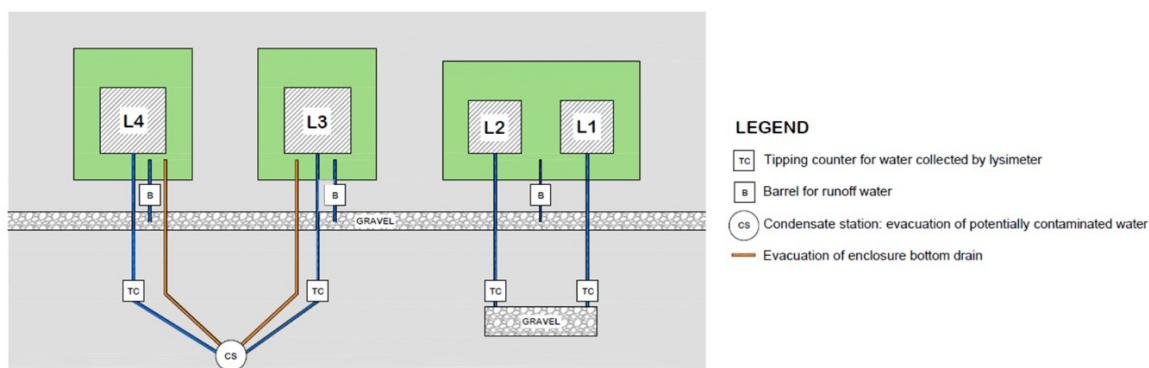


Figure 3.14 - Vue en plan du schéma des cellules

Les lysimètres sont conçus à grande échelle pour simuler les conditions réelles de terrain. Les lysimètres de grande dimension (pan lysimeters) sont capables de reproduire l'hétérogénéité des couvertures du point de vue des propriétés du sol, microfissures et végétation. Dans ce contexte, L1 et L2 ont la dimension de 4m x 4m, tandis que L3 et L4 ont 5m x 5 m.

3.4.3 Validation par modélisation numérique

La modélisation numérique est un élément fondamental et de nombreuses applications dans ce projet de recherche. Dans le cadre de ce mémoire de recherche, la modélisation est utilisée pour la validation du dimensionnement des lysimètres. En effet, le logiciel de modélisation numérique permet l'estimation des flux et des suctions au niveau de la bouche des lysimètres pour la vérification de l'existence, ou pas, du phénomène de déviation latéral.

3.4.3.1 HYDRUS – Équation de Richard

Le logiciel utilisé pour cette tâche est l'HYDRUS 2D/3D, développé par PC-Progress. Il a été choisi dans ce projet basé sur l'expérience de notre groupe et d'autres groupes de recherche associées qui observent que HYDRUS dispose d'une vaste gamme de fonctionnalités qui en font le plus compétant pour des analyses d'écoulement en sols non saturés. En effet, il est conçu pour l'analyse du mouvement de l'eau et des solutés dans des milieux poreux insaturés, partiellement saturés ou totalement saturés à deux et trois dimensions, dont tous les détails sont fournis dans le manuel technique.

Comme dit précédemment, dans ce projet il est utilisé pour l'étude de l'écoulement non saturé des sols. Alors, l'application du logiciel se centre sur la représentation graphique des propriétés hydrauliques du sol; les distributions en fonction du temps d'une variable particulière à des points d'observation sélectionnés; et les flux réels ou cumulatifs d'eau et de soluté à travers les limites d'un type particulier. Les résultats d'une modélisation pour être présenté au moyen de lignes de contours, de cartes spectrales et de vecteurs de vitesse.

HYDRUS résout numériquement l'équation de Richards par le biais d'équations d'écoulement et d'advection-dispersion à saturation variable pour le transport de chaleur et de soluté. La méthode de Richards [1931] est une progression de la loi de Darcy [1856]. En effet, Richards ajoute la considération que la constante de proportionnalité k (conductivité hydraulique) est un paramètre que varie en fonction de la teneur eau du sol tandis qu'une constante.

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[k(\theta) \left(\frac{\delta h}{\delta z} \right) + 1 \right] \quad \text{Équation 3.2}$$

Où k est la conductivité hydraulique, le h est la charge de pression relative par rapport la pression atmosphérique; le z est la charge d'élévation d'un point; le θ est la teneur en eau volumétrique; et t est le temps.

3.4.3.2 Données météorologiques d'entrée

Pour l'analyse d'écoulement sur HYDRUS deux types de données sont fournis comme paramètres d'entré, soient : Les propriétés hydrauliques du sol et les données météorologiques. Les paramètres hydrauliques du sol sont ceux de la méthode Van Genuchten caractérisés lors des essais au laboratoire (voir 3.3.4.3 et 3.3.4.4). Les données météorologiques nécessaires sont la précipitation et l'évapotranspiration. La période choisie comme représentative est 2009-2017. Il est à noter que la convergence de la numérisation est parfois problématique pour la période initiale de l'analyse et aussi à la fin (effet de bordures). Dans ce contexte, la période considérée la plus stable pour l'analyse de résultats et celle du milieu, soit 2013-2015.

3.4.3.3 Schéma de modélisation

La modélisation numérique de lysimètres en logiciels d'éléments finis est complexe. Les conditions limites imposées et les paramètres hydrauliques des sols choisis peuvent facilement empêcher la convergence de l'analyse. Dans ce contexte, le schéma de modélisation établie est le plus simplifié possible. Le lysimètre choisi est le L2, dont le remplissage est le sol recouvrement. La couche de terre végétale n'est pas incluse dans le modèle pour éviter problèmes de convergence à l'interface entre les deux matériaux. D'ailleurs, la couche drainante (sable/gravier) n'est pas nécessaire, étant donné qu'elle ne transmet aucune succion au système. Des expériences précédentes du groupe de recherche montrent que cette simplification n'altère pas les résultats finaux et évite des problèmes de convergence.

La condition de contour « *no flux* » est appliquée autour des parois des lysimètres pour simuler la geomembrane. Pour le drainage du fond du lysimètre, le guide d'utilisation d'Hydrus suggère la condition « *seepage face* ». Cette condition impose une pression égale à zéro à la base, ce qui est compatible avec la réalité de terrain. La condition utilisée pour drainer l'eau du modèle, en simulant la percolation de l'eau vers les déchets, est le « *free drainage* ». À la surface supérieure du modèle il est introduit la condition de contour « *atmospheric boundary* » pour informer au

modèle les données climatiques à utiliser (3.4.3.2) et l'interface d'application. La Figure 3.15 présente le schéma de la modélisation faite avec les respectives conditions de contour.

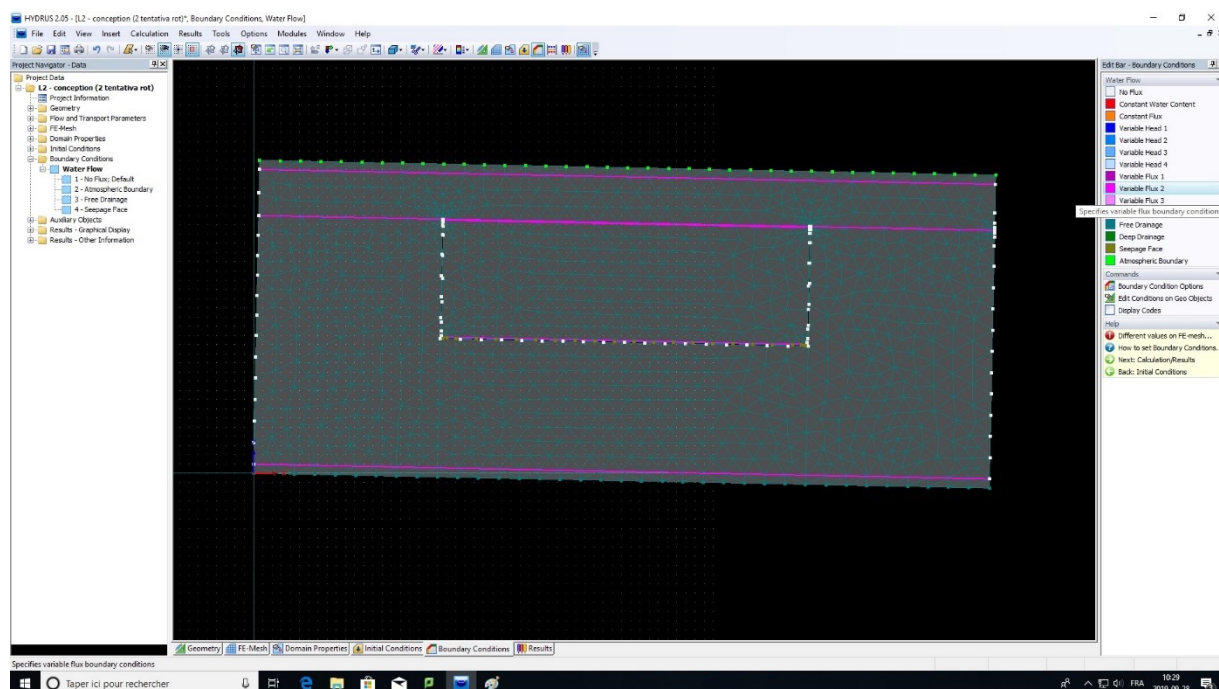


Figure 3.15 - Capture d'écran de la modélisation avec les conditions de contours utilisés

3.4.3.4 Analyse préliminaire

Malgré les définitions décrites précédemment, le modèle ne permet pas le démarrage de l'analyse numérique. Lors des calculs, le logiciel présente une erreur liée aux conditions initiales de teneur en eau à la ligne de fond du lysimètre, comme présenté par la Figure 3.16. En effet, Hydrus informe que les conditions initiales imposées à la phase de définition de géométrie du logiciel sont incompatibles avec celles imposées au maillage. Pourtant, après l'application des actions proposées par Hydrus pour régler le problème, une autre erreur est informée : la condition initiale problématique devient l'écoulement d'eau (Figure 3.17). Une fois réglée la deuxième erreur, le logiciel retourne à la première et de cette façon le problème interagit en boucle. Malgré les tentatives de régler le problème (recommencer le modèle, changer la condition du point) aucune n'a fonctionné.

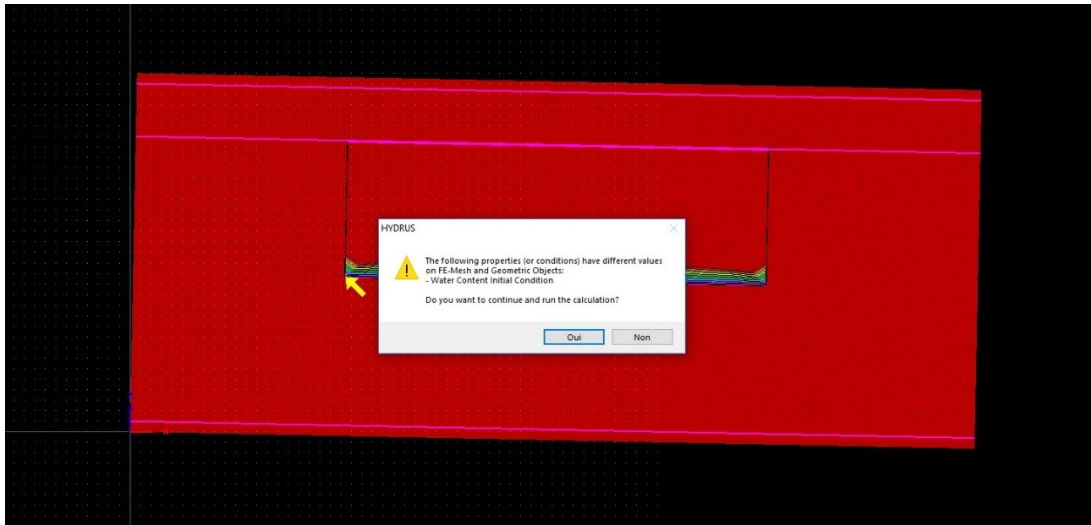


Figure 3.16 - Erreur de la condition initiale de teneur en eau

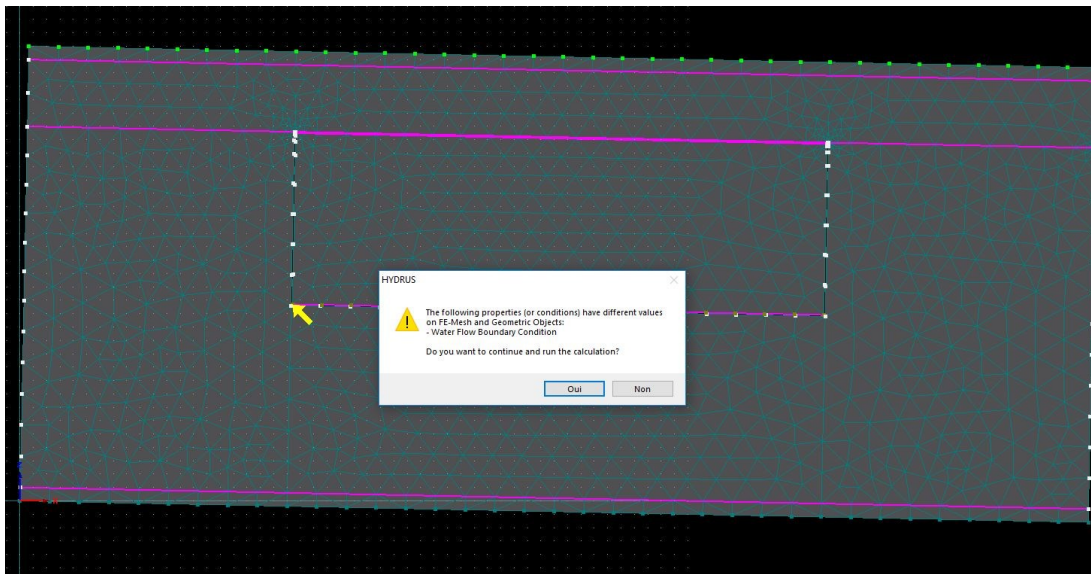


Figure 3.17 - Erreur de la condition initiale de l'écoulement d'eau

Pour les futurs travaux du groupe, il est recommandé la solution du problème en explorant d'autres ressources disponibles sur Hydrus. Il vaut mieux comprendre les configurations du système, par exemple les définitions des *mesh-lines*. D'ailleurs, il est possible à jouer avec les paramètres d'interactions du logiciel pour qu'il soit capable de réaliser les calculs. À savoir qu'Hydrus est un logiciel complexe qui offre un large éventail de possibilités qui seront utiles au projet en considérant que les analyses par modélisation sont fondamentales pour les réponses scientifiques concernant la performance des lysimètres aux mesures des percolations.

3.4.4 Design de couches

La disposition des couches des matériaux de remplissage pour chaque lysimètre est présentée de la Figure 3.18 à la Figure 3.21. Les sols sont placés avec la même disposition soit à l'intérieur ou à l'extérieur, puisque selon la méthodologie de conception, il est impératif que la succion dans la bouche du lysimètre soit la même pour que le lysimètre ait un bon fonctionnement.

Il faut remarquer l'ajout de deux éléments dans la conception de l'ensemble des lysimètres, soient : la couche de drainage et la couche de terre végétale. En effet, la couche de drainage (voir sous-section 3.3.1) est placée au fond et uniquement à l'intérieur du lysimètre pour faciliter le drainage de l'eau. La couche de terre végétale (top soil) est un élément prévu par l'article 50 du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles [Gouvernement du Québec, 2009] dont la fonction est la protection du recouvrement contre les racines des plantes que peuvent créer des chemins préférentiels de percolation.

La Figure 3.18 et Figure 3.19 montrent que L1 et L2 sont remplis uniquement avec le sol recouvrement tandis que L3 et L4 possèdent une composition mixte de matériaux. Il est possible à remarquer que L3 et L4 (Figure 3.20 et Figure 3.21) disposent d'une couche de recouvrement en dessous des couches de sols contaminés. Cette disposition est conçue en vue de simuler un possible reprofilage du terrain que consiste-en superposer des matériaux moins perméables testés, sur la couverture existante.

La Figure 3.20 illustre une particularité concernant le design de L3. Dans la mesure où il est rempli partiellement par un sol dont la contamination est plus élevée (BC), il est prévu l'ajout d'une couche de 0,15m de recouvrement dans le but de réduire les risques de contamination de l'eau de surface. Dans le cas de L4, le sol du type AB est déjà accepté par le règlement comme un sol de construction de couvertures en sites d'enfouissement. Alors la couche de sol AB peut monter jusqu'à l'interface avec le topsoil.

En plus, les figures présentent l'emplacement des instruments installés dans chaque lysimètre. Les détails de l'instrumentation sont présentés dans la prochaine section de ce mémoire.

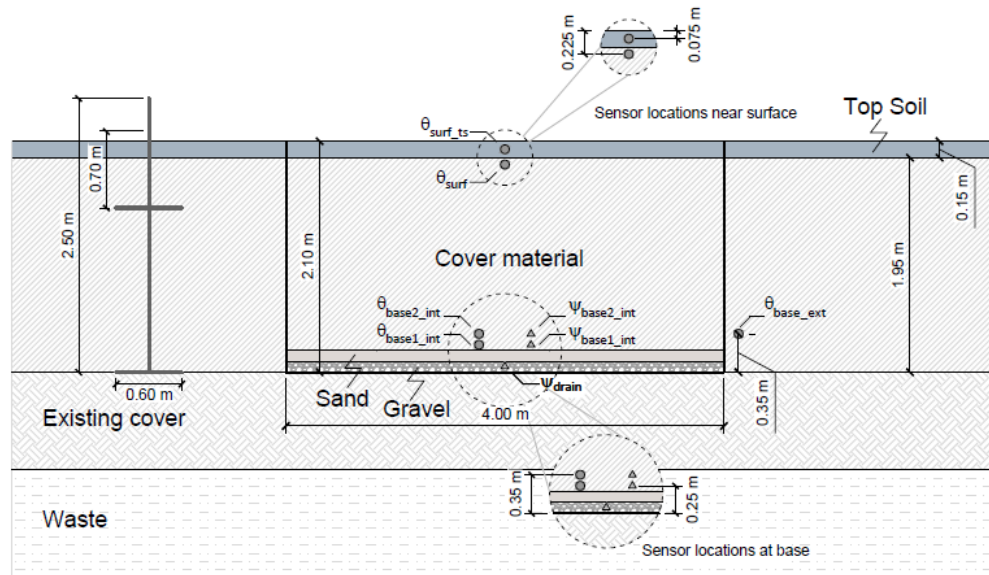


Figure 3.18 - Coupe de profil avec les instrumentations du L1

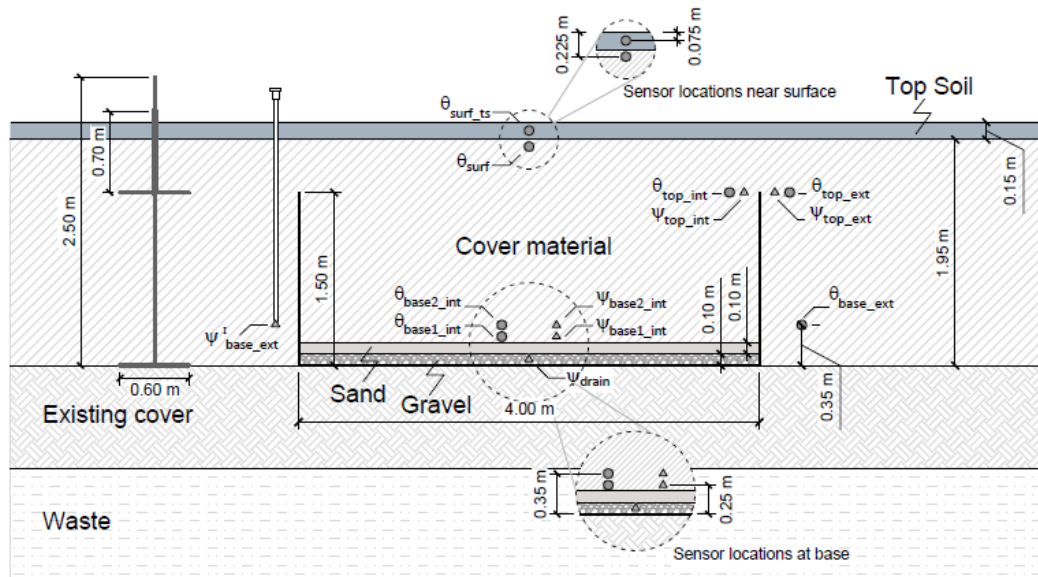


Figure 3.19 - Coupe de profil avec les instrumentations du L2

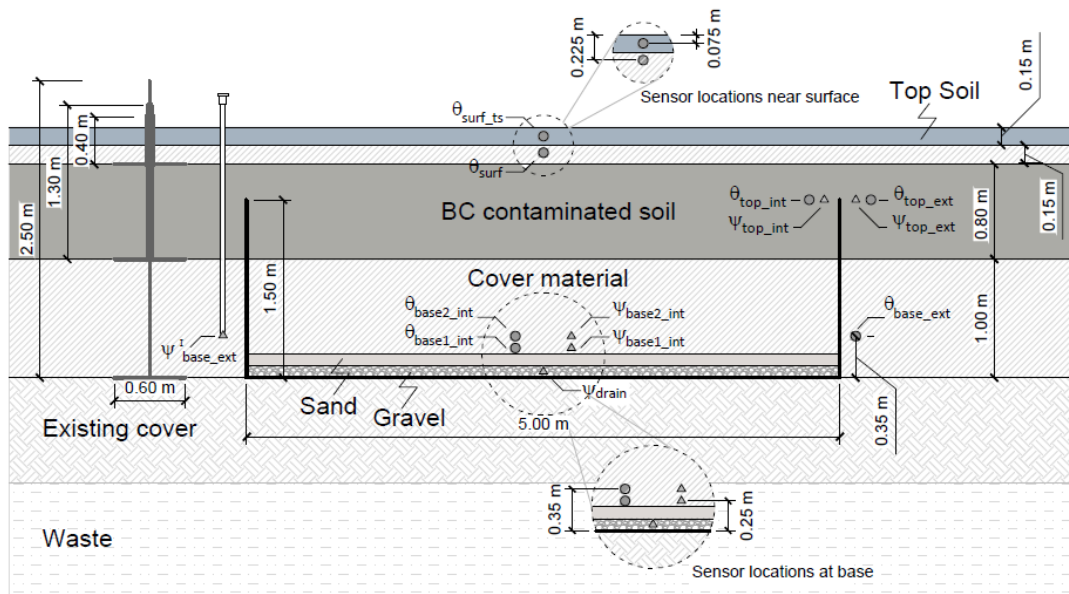


Figure 3.20 - Coupe de profil avec les instrumentations du L3

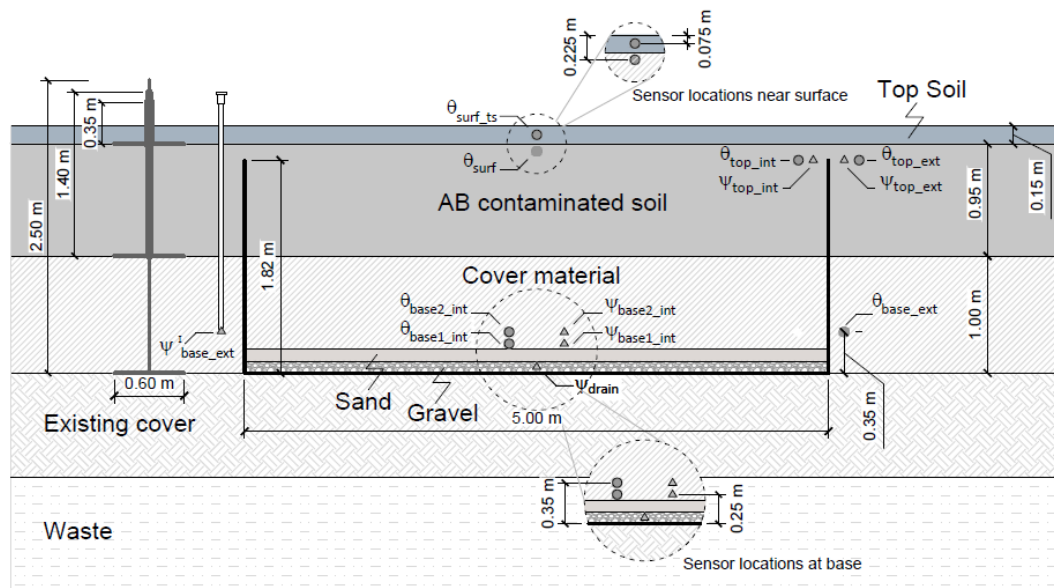


Figure 3.21 - Coupe de profil avec les instrumentations du L4

3.5 Instrumentation

Un ensemble d'instruments est conçu pour équiper le plan expérimental de façon à obtenir des réponses sur le comportement hydraulique des différents types de sols testés. D'ailleurs, l'instrumentation est utilisée pour la validation de l'efficacité des lysimètres pour l'estimation des infiltrations des couvertures en sites d'enfouissement. En résumé, l'instrumentation à l'objectif de: faire le suivi continue de la quantité de l'eau qui percole à travers le sol dans chaque lysimètre; contrôler les quantité/qualité de l'eau de ruissellement des cellules; et fournir des éléments nécessaires pour l'estimation du bilan hydrique de terrain qui sera utilisé pour l'obtention d'un modèle calibré de prédiction d'infiltrations.

Cette section est responsable pour la présentation en détails concernant l'instrumentation, soit : les types d'instruments; les acquisiteurs de données, et les tests de conformité/calibration. Dans ce contexte, le Tableau 3.10 présente les instruments utilisés et leur implication dans le contexte du bilan hydrique de terrain.

Tableau 3.10 - Éléments d'un bilan hydrique x instrumentation

Éléments du bilan hydrique	Type d'instrument
Précipitation	Station météorologique
Ruissellement	Compteur basculant (tipping counter)
Évapotranspiration	Sonde de teneur en eau
Emmagasinement	Sonde de teneur en eau + tensiomètres
Percolation	Compteur basculant (tipping counter)

Parmi l'instrumentation du projet, deux types d'instruments disposent d'une multiple capacité d'application : les sondes de teneur en eau et les tensiomètres. La surveillance de la teneur en eau et succion en profondeur permet la contre-vérification de la mesure de percolation faite par le compteur basculant. En plus, ces sondes sont un bon outil de vérification de performance des lysimètres. Les sondes installées dans la bouche des lysimètres peuvent détecter une déviation latérale de l'eau infiltrée. D'ailleurs, ces sondes sont utilisées pour la reconstitution de la CRE des matériaux à l'échelle du terrain, ce qui est essentiel pour la modélisation numérique à être réalisé par le groupe de recherche en travaux futurs.

3.5.1 Sonde de teneur en eau

L'équipement choisi pour les mesures de teneur en eau est la sonde 5TM (Figure 3.22.a) fabriquée par Decagon Devices Inc. (entreprise du groupe METER). Ce type de sonde est aussi capable de faire des lectures de température. L'acquisiteur utilisé (même fabricant) pour l'enregistrement des données est le boîtier Em50 (Figure 3.22.b). Un boîtier Em50 comporte la lecture simultanée de 5 sondes.



Figure 3.22 - Instrumentation pour la mesure de la teneur en eau
[(a) tiré de Hoskin Scientifique, 2019; (b) tiré de ICT International, 2019]

Les emplacements des sondes 5TM sont illustrés aux figures de la sous-section 3.4.4. Les détails concernant le rôle de chaque 5TM en fonction de la position sont décrits dans le Rapport de Construction.

3.5.1.1 Méthode de calibration

La sonde 5TM ne fournit pas des mesures de teneur en eau de façon directe. En réalité, la sonde mesure la permittivité diélectrique du milieu (dans ce cas, le sol) par le biais d'un champ électromagnétique créée par l'équipement. L'acquisiteur fournit aux trois tiges de la sonde une onde oscillante de 70 MHz qui se charge en fonction de la permittivité diélectrique. Cette charge est proportionnelle aussi à la teneur en eau du sol ce qui permet son estimation.

Dans ce contexte, une calibration de 5TM devient nécessaire pour la conversion des valeurs de permittivité diélectrique (exprimées en millivolts, mV) en valeurs de teneur en eau volumique. L'acquisiteur Em50 dispose d'une calibration standard du fabricant basée sur Topp [1980].

$$VWC = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_a - 5.3 \times 10^{-2} \quad \text{Équation 3.3}$$

Néanmoins, le manuel de l'équipement affirme que la calibration proposée par le fabricant n'est pas adéquate pour tous les types de sols. Alors il est suggéré la réalisation d'une nouvelle calibration en laboratoire pour les matériaux utilisés.

La calibration du 5TM est basée sur le même principe de l'essai de Proctor. Des échantillons d'un même sol, mais de différentes teneurs en eau (varient autour de 5% à 25%) sont compactés dans un moule Proctor. Pour assurer une densité plutôt faible, l'échantillon est compacté avec un marteau de 2,5kg de poids, en appliquant 10 coups par couche (3 couches). Les 3 tiges du 5TM (semblable à une fourchette) sont insérées verticalement dans l'échantillon pour la lecture en mV. Étant donné que la teneur de chaque échantillon est connue, les points de calibration correspondants aux lectures diélectriques sont tracés dans un graphique (exemple montré par la Figure 3.23) à l'aide du logiciel Excel. Les sols calibrés sont : le recouvrement (cover), le sol AB (AB soil), le sol BC (BC soil) et la terre végétale (topsoil).

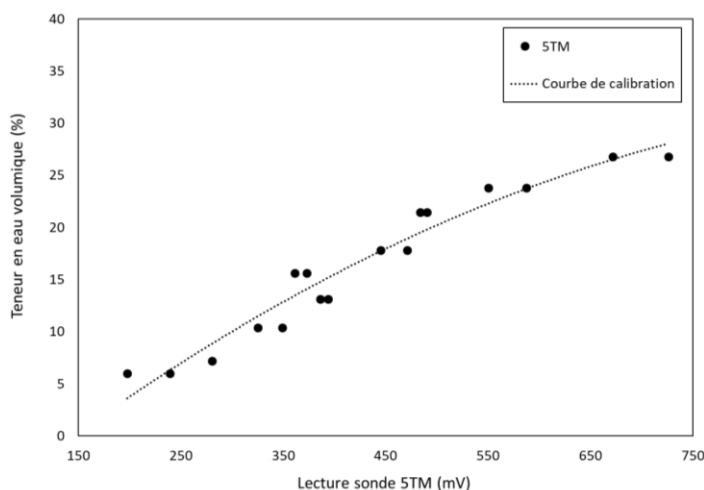


Figure 3.23 - Exemple des points de calibration réalisé en laboratoire

À partir des points tracés au graphique, la courbe de calibration peut être estimée en utilisant la fonction disponible sur Excel « courbe de tendance ». En considérant l'allure de la courbe, différents types d'équations sont testés pour trouver le meilleur ajustement aux points. Le critère statistique de validation de l'ajustement de la courbe est le R^2 . Trois types d'équations sont appliqués : la Polynomiale 2e degré, la puissance et la logarithmique. Le Tableau 3.11 présente les valeurs de R^2 obtenus pour chaque sol en fonction de l'équation choisie.

Tableau 3.11 - Comparaison des R^2 obtenus lors du lissage avec différentes équations

	Topsoil	Cover	AB soil	BC soil
Polynomial 2	0,964	0,947	0,907	0,963
Logarithmique	0,932	0,913	0,908	0,958
Puissance	0,978	0,904	0,895	0,959

Les valeurs de R^2 sont relativement proches de 1 pour tous les modèles testés. Pourtant, il faut remarquer que le test de R^2 n'est pas le seul critère de choix de la courbe de calibration. Dans ce contexte, les courbes sont comparées graphiquement pour l'observation du comportement des modèles dans une gamme plus large de mesures en mV (Figure 3.24 à Figure 3.27). En plus, l'équation standard de calibration du 5TM [Topp,1980] est incluse dans l'analyse des courbes.

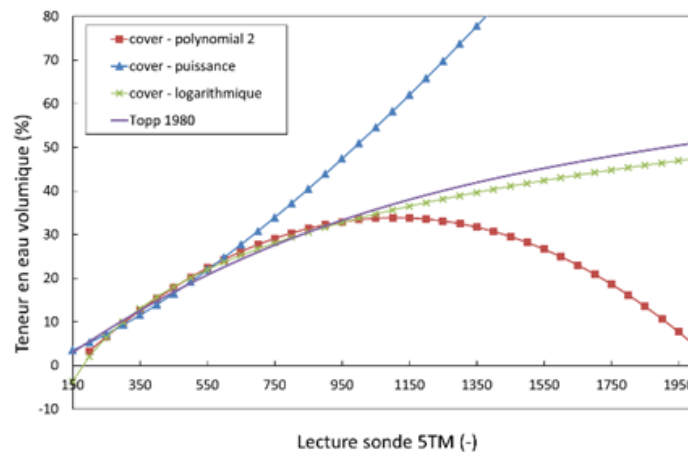


Figure 3.24 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol recouvrement (cover)

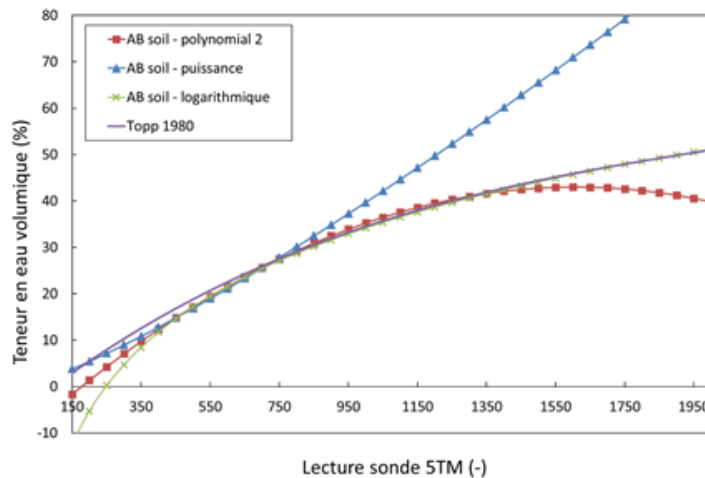


Figure 3.25 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol AB (AB soil)

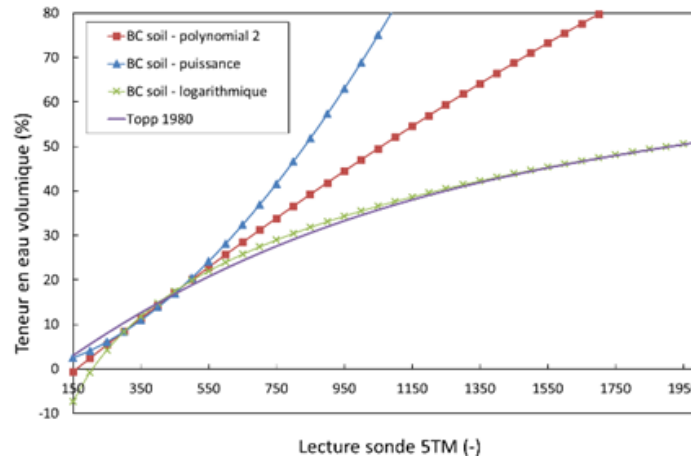


Figure 3.26 - Courbes de calibration du 5TM pour le sol BC (BC soil)

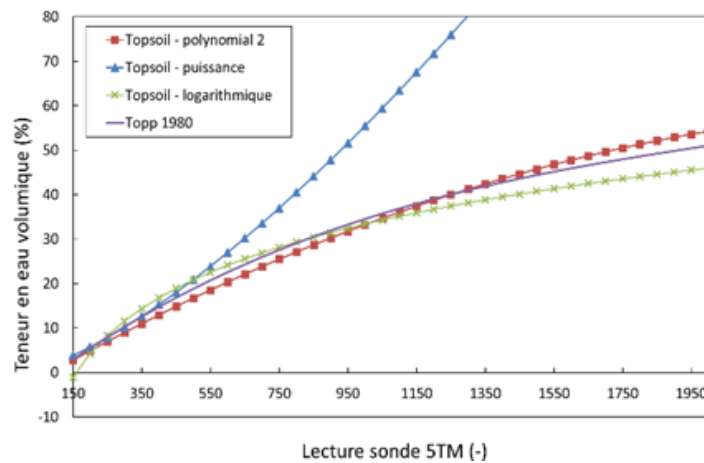


Figure 3.27 - Courbes de calibration du 5TM pour la terre végétale (Topsoil)

La fonction puissance n'est pas adéquate pour la calibration due au fait que valeurs de teneur en eau augmentent exponentiellement pour une petite variation de lecture en mV. C'est-à-dire, la courbe atteint des valeurs excessivement élevées (parfois incohérents) très rapidement. La fonction polynomiale présente le désavantage de diminuer les valeurs de teneur en eau, à partir d'un certain point, lorsque la lecture en mV augmente (Figure 3.24 et Figure 3.25).

Le modèle logarithmique et celui de Topp [1980] semblent être le plus adéquats. D'ailleurs, les courbes convergent entre elles pour les 4 types de sols testés. Cependant, l'équation logarithmique fournit des valeurs négatives de teneur en eau pour des lectures autour de 150 mV. Alors, la courbe de calibration choisie est celle de Topp [1980].

3.5.2 Tensiomètre

Le tensiomètre est l'instrument utilisé pour la mesure directe de la succion du sol, qui est l'élément essentiel pour l'étude de l'écoulement non saturé des sols. L'équipement choisi pour le projet est le tensiomètre du modèle T4e (Figure 3.28.a) fabriqué par UMS GmbH München (entreprise du groupe METER). L'eau du sol et l'eau du tensiomètre sont en contact à travers la pierre poreuse de la pointe, qui crée une interface idéale entre les pores et l'eau. La succion du sol est directement transmise au transducteur de pression qui offre un signal continu à l'acquisiteur de données. L'équipement utilisé pour l'enregistrement est le boîtier DL6 Data Logger fabriqué par Delta-T Devices Ltd.



Figure 3.28 - Instrumentation pour la mesure de succion

[(a) tiré de Hoskin Scientifique, 2019; (b) tiré de Meter Groupe AG 2011]

Les tensiomètres fonctionnent de +100 kPa (pression de l'eau) à -85 kPa (succion). Si la succion du sol dépasse la valeur de -85 kPa, la pierre poreuse s'assèche et le tensiomètre doit être rempli en vue d'assurer la saturation adéquate pour son fonctionnement. Tous les tensiomètres du projet sont saturés en laboratoire selon le processus décrit par le fabricant (p.24 du manuel) avant l'installation sur le terrain. Ensuite à la saturation un test de conformité est fait : le tensiomètre est inséré dans un tube avec une colonne d'eau de 7,5 cm de hauteur. Si l'eau dans le tube n'a pas des bulles, la lecture doit être de 0 kPa.

Ainsi que la sonde de teneur en eau, le tensiomètre est un équipement de fonctionnement électrique dont les lectures sont faites en mV. Dans ce contexte, une calibration doit être réalisée. En fonction des aspects liés à l'échéancier, la calibration a été réalisée en laboratoire après la

construction du plan expérimentale. Comme tous les tensiomètres sont déjà installés sur place, la calibration est faite uniquement avec un tensiomètre disponible au laboratoire

3.5.2.1 Méthode de calibration.

Comme dit précédemment, le tensiomètre T4e émet des lectures en mV. La courbe de calibration fait la conversion de ces lectures en unité de pression. De la même façon que le test de conformité, la calibration est faite à l'aide d'une burette graduée remplie avec une colonne d'eau. L'hypothèse est que le comportement de la courbe serait le même, soit pour des valeurs de pressions ou de succion. À partir du point de pression de 0 kPa (à 7,5cm), des incréments de 5 cm de l'eau sont ajoutés pour avoir les respectives mesures de pression en mV, jusqu'à la hauteur de 25cm. La procédure de calibration est faite pour les trois DL6. La Figure 3.29 présente les courbes obtenues par la régression linéaire et en imposant l'interception par zéro.

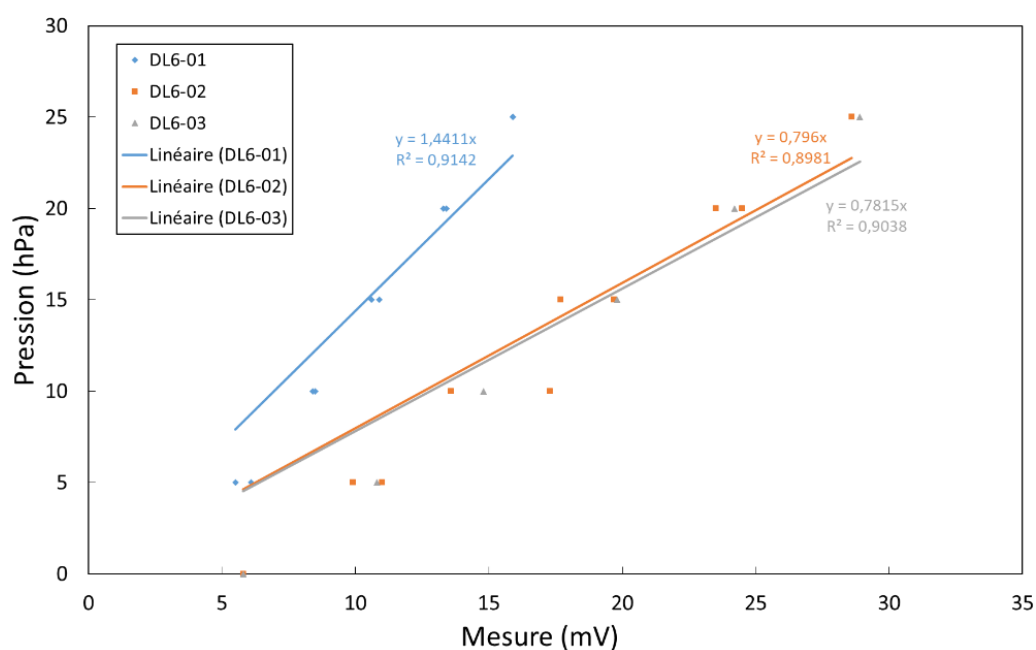


Figure 3.29 - Courbe de calibration des DL6 en interceptant par zéro

Malgré l'obtention des équations de calibration et leur utilisation pour l'analyse des données de la première année du plan expérimental, cette première calibration a une erreur significative d'hypothèse. Il est à noter que le manuel du T4 prévoit un décalage de 0,5kPa lié à la lecture zéro mV du tensiomètre, alors, l'interception n'est pas à l'origine du graphique. De cette façon, les courbes sont révisées selon l'indication du fabricant comme montré par la Figure 3.30.

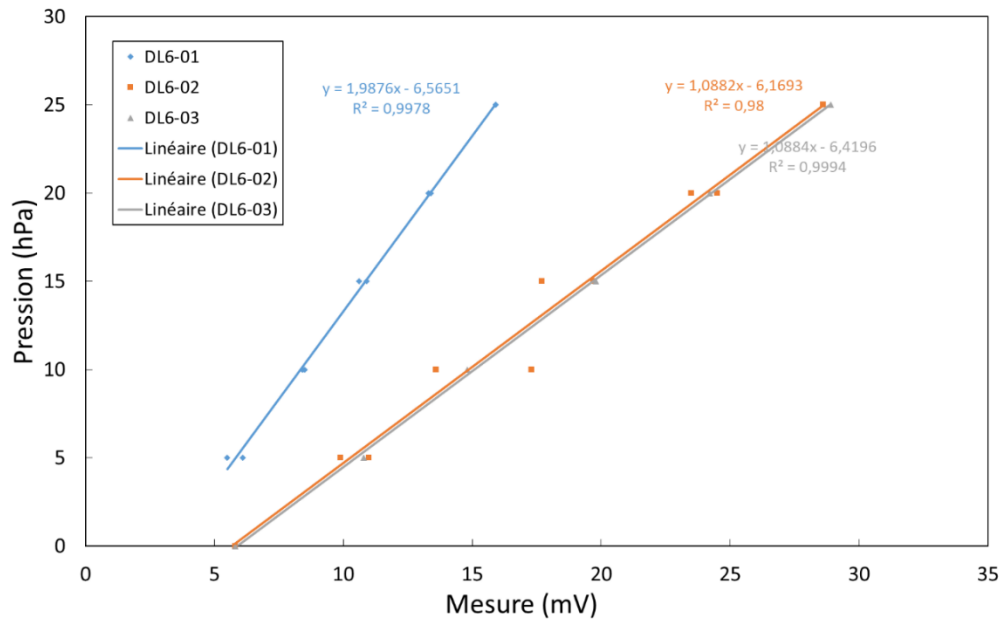


Figure 3.30 - Correction de la courbe de calibration des DL6

Il faut remarquer que les boîtiers DL6-02 et DL6-03 disposent pratiquement de la même courbe de calibration. Probablement, la différence rencontrée pour le boîtier DL6-01 découle des erreurs d'exécution en laboratoire. Les nouvelles équations sont plus cohérentes avec les points mesurés. Cependant, la procédure n'est pas encore l'idéale. Il serait plus adéquat que la calibration des tensiomètres prévoit des points dans la gamme de valeurs de succion pour attester que la courbe de calibration est linéaire (avec le même coefficient angulaire), soit pour de valeurs de pressions et succions. D'ailleurs, pour que les courbes soient plus représentatives il est intéressant la réalisation de la calibration en utilisant tous les tensiomètres du projet.

Dans ce contexte, ce mémoire indique aux travaux futurs du groupe de recherche qu'une calibration pour chaque tensiomètre soit faite directement sur le terrain au cours de l'été et automne 2019. Avec un équipement dénommé INFIELD, du même fabricant du T4e, il est possible l'enregistrement des mesures de succion en unité de pression étant donné que son équation de calibration est déjà intégrée dans l'appareil. Par le biais des lectures du INFIELD (en kPa) et de mesures captées par le boîtier DL6 (en mV) au même moment, il est possible de tracer une nouvelle courbe de calibration plus précise.

Il est important de mentionner que les résultats qui impliquent les mesures de succion pour la période analysée dans le cadre de ce mémoire sont traités selon les équations obtenues par la première calibration. Ces valeurs doivent être révisées lors de la conclusion de la méthode de terrain proposé précédemment.

Au cours de la première année de fonctionnement des lysimètres, un autre type de tensiomètre est installé sur le terrain pour la redondance de réponses du T4e et aussi pour compléter les informations de succion à certains niveaux des lysimètres. L'équipement utilisé est le Irrrometer. Pourtant, l'application de cet instrument n'est pas intégrée dans le cadre de ce mémoire. La présentation de l'instrument, sa calibration et les résultats obtenus seront présentés dans travaux futurs du groupe de recherche.

3.5.3 Compteur basculant (tipping bucket)

Un des éléments essentiels du bilan hydrique de terrain est la quantité d'eau percolé par les lysimètres et celle provenant du ruissellement des cellules. Dans ce but, des tipping buckets sont choisis pour la comptabilisation. L'instrument utilisé dans ce projet est le compteur du modèle KIPP-100 fabriqué par UMS GmbH München (entreprise du groupe METER). L'acquisition des données est faite par le boîtier HOB0 fabriqué par Onset Computer Corporation.

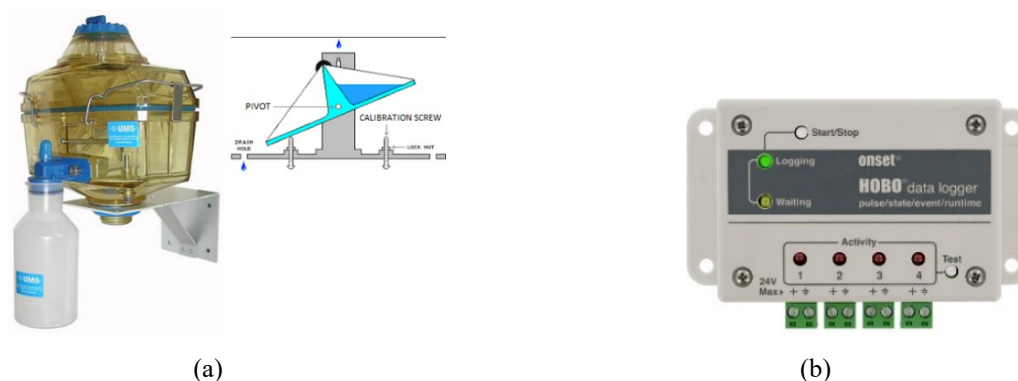
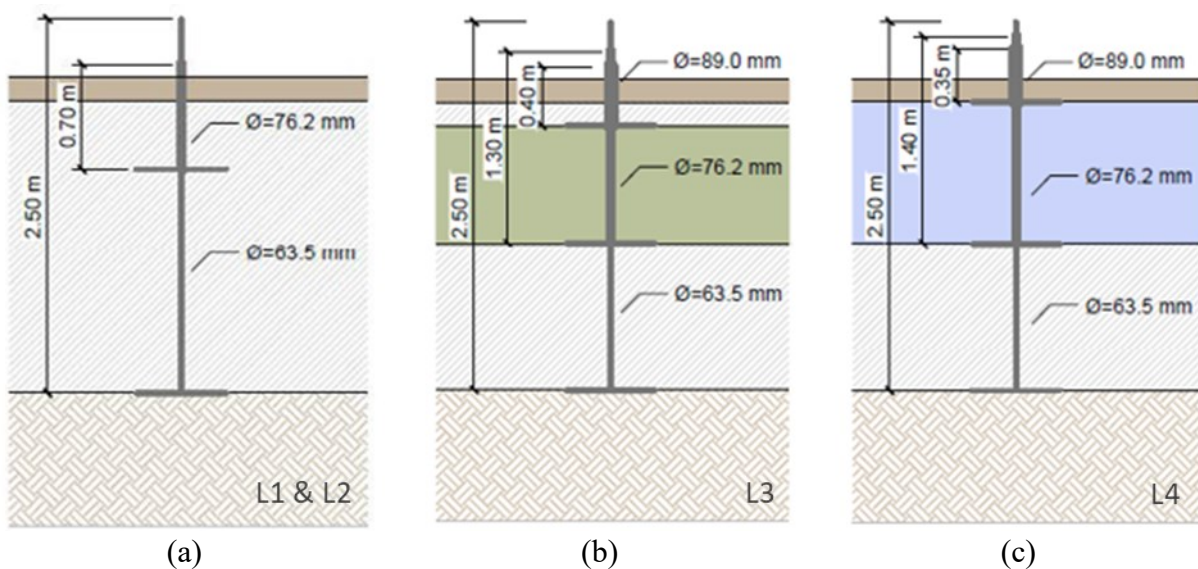


Figure 3.31 - Instrumentation pour comptabilisation de l'eau [tiré de Hoskin Scientifique, 2019]

Le KIPP-100 est calibré par le fabricant de façon que chaque mouvement de la bascule comptabilise 100 ml de l'eau. Le test de conformité fait est assez simple et consiste en verser 500 ml de l'eau sur l'instrument pour attester que la bascule atteint les 5 mouvements attendus.

3.5.4 Plaque de Tassement

La plaque de tassement est l'instrumentation conçue pour monitorer le tassement des couches de remplissage des lysimètres et leurs cellules. Ce type de contrôle est important puisqu'un tassement peut entraîner un changement significatif de la densité et par conséquent altérer la conductivité hydraulique du sol. Trois plaques de tassement sont prévues : une pour L1 et L2 et une pour chacun des autres lysimètres. Dans le cas de la cellule de L1 et L2, la plaque est placée entre les 2 lysimètres. Le schéma de conception du système de contrôle des tassements est montré par la Figure 3.32.



La plaque de tassement inférieure est soudée avec un poteau métallique cylindrique et placé au fond de l'excavation. Le poteau est construit pour dépasser la surface du terrain. Les plaques suivantes sont placées à chaque transition de couches. Les plaques suivantes sont soudées avec des poteaux creux. Le poteau creux glisse sur le poteau précédent et dépasse également à la surface, mais il doit être légèrement plus court que le précédent. La distance entre les extrémités des poteaux permet la mesure de tassement pour chaque couche de sol au fil du temps. Il est à noter dans la Figure 3.33(b) l'utilisation d'une isolation avec un type de styromousse pour la protection des plaques métalliques contre la glace.

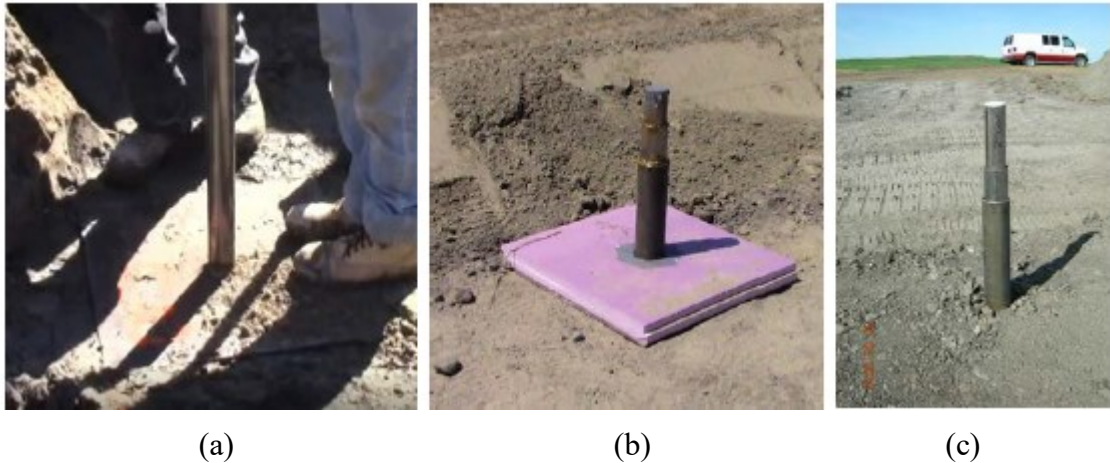


Figure 3.33 - Système de contrôle des tassements

3.5.5 Station Météorologique

Les données météorologiques sont mesurées sur le terrain par le biais de deux stations du modèle Davis Vantage Pro 2 fabriqué par Davis Instruments. Une des stations est placée à côté de la zone du plan expérimental tandis que l'autre est située en bas de la pente, à côté d'un bassin de sédimentation des eaux de surface du site d'enfouissement (Phase I).

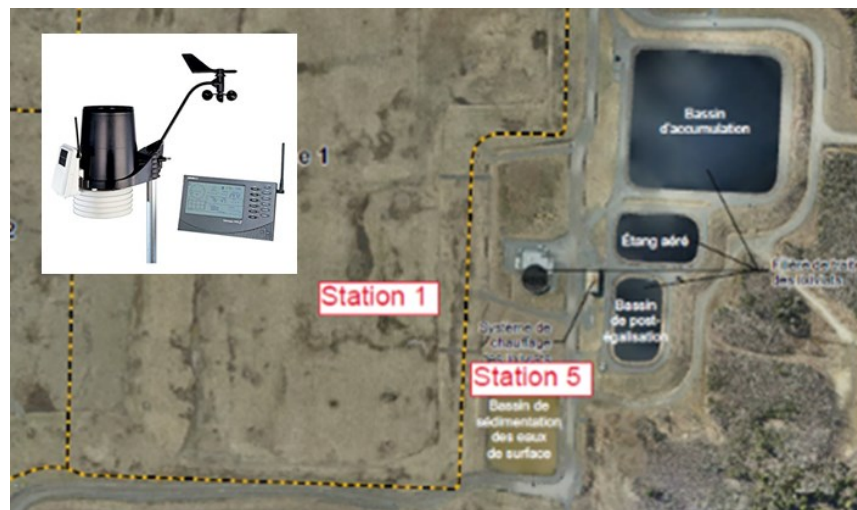


Figure 3.34 - L'emplacement des stations météorologiques Davis Vantage Pro 2

Ce modèle de station permet la mesure des certains paramètres, soit : la température, la vitesse des vents, la pluviométrie et la radiation solaire. L'acquisition de données est réalisée par la console de la station dont l'enregistrement se fait par communication Bluetooth.

3.5.6 Nomenclature de projet

Une nomenclature de projet est conçue pour faciliter l'identification du type d'instrument et son emplacement, lors de la présentation sur les plans et schémas. Le Tableau 3.12 présente le principe utilisé pour la composition de la nomenclature des instruments du plan expérimental.

Tableau 3.12 - Tableau explicatif de la nomenclature de l'instrumentation

Symbole	θ – Sonde de teneur en eau 5TM (Meter Inc.)
	ψ – Tensiomètre T4e (Meter Inc.)
Location	Base – À la base du lysimètre. Le nombre 1 renvoie à la sonde installée près du sable soit à 0,25 à partir du fond du lysimètre tandis que le nombre 2 est situé à 0,1 m au-dessus, soit à 0,35 à partir du fond.
	Top – Au niveau de la bouche du lysimètre (au bord du coffrage).
	Surf – Près de la surface, celle qui est installée dans le topsoil est identifiée (ts) et l'autre est à l'interface entre le topsoil et le sol.
Position	Int – Intérieur du lysimètre
	Ext – Extérieur du lysimètre

4 Travail de Terrain

Ce chapitre se concentre sur la phase d'implantation du projet. Il est présenté brièvement : les étapes de construction; le contrôle de qualité des travaux journaliers; l'installation de l'instrumentation, et l'opération du plan expérimental ensuite à la construction. Les informations plus détaillées de la construction sont présentées dans le Rapport de Construction. Ce rapport est un document élaboré par le groupe de recherche, dont la première version est émise en février 2019 pour notre partenaire industriel Waste Management. D'ailleurs, la dernière section de ce chapitre est destinée à la présentation des problèmes affrontés et les perfectionnements réalisés sur le plan expérimental au long de la première année de projet.

4.1 Construction et ces étapes

La construction du plan expérimental commence à la date de 15 mai 2018. Les activités de construction lourde se déroulent dans la période de mai/juin soutenues par des employés de l'entrepreneur général RGC Construction et des travailleurs de Waste Management. En plus, un groupe formé par des étudiants, techniciens et professeurs de l'Université de Sherbrooke était directement impliqué sur le terrain. Ensuite à la phase de construction lourde, dans les deux premiers mois une équipe d'étudiants a été responsable par l'installation de l'instrumentation complémentaire et le démarrage d'acquisition de données.

Les premières étapes de construction ont été respectivement : l'excavation du terrain; le montage du coffrage; l'emplacement de la geomembrane; le bricolage des drains de fond des lysimètres; l'exécution des drains des cellules; l'installation du géotextile de protection; l'emplacement de la couche drainante à l'intérieur des lysimètres; le remplissage des lysimètres et cellules avec les matériaux (couches compactées) définis lors de la conception; l'exécution des bermes de contrôle du ruissellement; définition de la pente des cellules et la couverture finale en terre végétale. Il faut remarquer que l'installation des sondes de teneur en eau et des tensiomètres a été faite simultanément au remplissage des sols selon la profondeur de projet de chaque instrument (sous-section 3.4.4).

Les photos des activités sont disponibles à <https://photos.app.goo.gl/mYFp71qy9FWsrec59> ou en vidéo sur le lien YouTube : [youtube.com/watch?v=z4kyp8QCa1I&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=z4kyp8QCa1I&feature=youtu.be). Les Figure 4.1 à Figure 4.14 présentent les séquences des activités de la construction lourde.



Figure 4.1 - Excavation



Figure 4.2 - Montage coffrage



Figure 4.3 - Emplacement geomembrane



Figure 4.4 - Drain de fond



Figure 4.5 - Protection du drain de fond



Figure 4.6 - Drain de la cellule



Figure 4.7 - Géotextile de protection



Figure 4.8 - Couche drainante



Figure 4.9 - Remplissage avec sols



Figure 4.10 - Compactage des couches



Figure 4.11 - Installation de l'instrumentation



Figure 4.12 - Exécution des bermes



Figure 4.13 - finalisation des pentes des cellules



Figure 4.14 - Couverture finale en terre végétale

Pour exemplifier l'envergure et la complexité de ce projet de recherche, il est possible à citer certains chiffres : plus de 1000 m³ de différents sols ont été mis en place, approximativement 70 sondes ont été installées dans les cellules, 13 acquisteurs enregistrent les données des sondes et 2 stations météorologiques font le suivi des conditions climatiques du terrain. Les Figure 4.15 et Figure 4.16 montrent la vue en plan du résultat final de la construction du plan expérimental, soit au mois de juin et au mois de juillet où la végétation est déjà présente.



Figure 4.15 - Vue aérienne du plan expérimental ensuite à la construction (juin 2018)



Figure 4.16 - Vue aérienne du plan expérimental déjà végété (juillet 2018)

4.2 Contrôle de qualité de la construction

Le contrôle de qualité des activités de la construction est le préalable fondamental pour la performance du plan expérimental. La représentativité des données fournies par l'instrumentation dépend directement de la qualité d'installation. Dans ce contexte, les activités réalisées durant la construction sont soumises à des critères sophistiqués d'exécution et contrôle.

Il est à noter que la construction a été appuyée par la topométrie (Figure 4.17) dans toutes les étapes. À l'aide d'une station totale, l'emplacement des lysimètres (Figure 4.18) ainsi que la position des sondes installées a été référencé pour l'élaboration des plans tels que construits. En plus, la topométrie a été utilisée pour la contre-vérification du nivellement des couches des lysimètres, dont l'inclinaison prévue en projet était de 2% (sous-section 3.4.2.3). Lors de l'emplacement du sol et le compactage, le nivellement des couches était réalisé avec un niveau laser (Figure 4.19 et Figure 4.19) et complémenté par la vérification topométrique.



Figure 4.17 - Topométrie avec station totale



Figure 4.18 - Emplacement des lysimètres



Figure 4.19 - Niveau laser



Figure 4.20 - Ajuste de niveau laser

Le contrôle de compactage est aussi remarquable dans ce projet. Les lysimètres et les cellules ont été remplis successivement par des couches d'environ 25 cm de sols. Le compactage était réalisé par le biais d'une plaque vibrante (un passage par couche) et complémenté par le compactage manuel dans les bordures des lysimètres. D'ailleurs, le compactage manuel (Figure 4.21) a été utilisé pour l'ajuste de régions où la finition de la plaque n'était pas adéquate.



Figure 4.21 - Compactage manuel des couches de sol

La densité des sols définie en projet est de 1600 à 1700 kg/m³. En vue d'assurer la densité envisagée et dans le concept de redondance de vérification, deux méthodes de contrôle de compactage ont été utilisées, soit : le cône de sable et le nucléodensimètre. Le Tableau 4.1 présente la densité moyenne finale de chaque lysimètre selon les mesures des deux types de tests.



Figure 4.22 - Essai de cône de sable



Figure 4.23 - Nucléodensimètre

Tableau 4.1 - Densité moyenne de sols par lysimètre selon le type d'essai

Lysimètre	Sol	Valeurs moyennes			
		Cône de sable		Nucléodensimètre	
		w (%)	ρ_d (kg/m ³)	w (%)	ρ_d (kg/m ³)
L1	Recouvrement	9,77	1603,03	10,85	1676,00
L2	Recouvrement	8,09	1279,96	15,90	1631,33
L3	Recouvrement	8,85	1644,11	7,37	1616,00
	BC	12,71	1649,62	-	1597,67
L4	Recouvrement	11,03	1593,76	0,00	0,00
	AB	8,98	1610,40	-	1830,40

Chaque type de sol utilisé pour le remplissage des lysimètres sur le terrain a été dûment échantillonné en sacs (Figure 4.24) pour le stockage en laboratoire. Au-delà de servir comme un inventaire scientifique du projet, ce matériau de secours permet une occasionnelle contre-vérification des propriétés hydro/géotechniques des sols ainsi que pour recalibrations de certains instruments, s'il est nécessaire pour de futurs travaux du groupe de recherche.



Figure 4.24 - Échantillonnage des sols utilisés pour l'inventaire du projet

Un mélange de bentonite avec le sable silteux disponible sur le terrain (recouvrement) a été créé (proportion de 1:5 – bentonite/sable) pour l'application à certains points susceptibles à des chemins préférentiels d'écoulement de l'eau puis assurer l'étanchéité des contacts. Dans ce contexte, le mélange a été utilisé autour des fils de l'instrumentation enfouie et dans la bordure supérieure du coffrage comme montré par les Figure 4.25 et Figure 4.26.



Figure 4.25 - Mélange étanche autour des fils



Figure 4.26 - Mélange étanche à la bordure

Comme montre dans la (section xxx) le principe de fonctionnement des compteurs de percolation (tipping bucket, Figure 4.27) utilise une bascule calibrée pour mesurer 100 ml à chaque mouvement. Pour assurer la bonne performance des tipping buckets, ils ont été installés à l'aide d'un niveau électronique et recalibrés sur le terrain (Figure 4.28).



Figure 4.27 - Tipping bucket



Figure 4.28 - Nivèlement des tipping buckets

4.3 Procédure standard d'opération

Comme déjà dit précédemment, la prévision de fonctionnement du plan expérimental est de 3 ans. Ceci est considéré le délai minimum nécessaire pour l'étude scientifique du comportement des lysimètres et pour avoir des réponses conclusives aux besoins du partenaire WM.

Malgré la technologie avancée de l'instrumentation installée, le plan expérimental n'opère pas tout seul. Évidemment, il existe des tâches quotidiennes indispensables pour le plein fonctionnement du plan expérimental pendant ces 3 ans. Par exemple, la source d'énergie de l'instrumentation est électrique, alors, les batteries des instruments et des data loggers doivent être rechargés ou remplacés. D'ailleurs, l'acquisition de données est faite à toutes les 15 minutes (24 heures par jour) pour la majorité des instruments, ce qui produit une grande quantité de registres dans la mémoire des data loggers. Dans ce contexte, le téléchargement quotidien devient intéressant pour assurer la production continue de données sans interruption en raison du manque d'espace.

Au-delà des aspects globaux de l'instrumentation explicitée au paragraphe précédent, chaque élément du plan expérimental demande un contrôle/suivi spécifique pour que la performance demeure adéquate. Étant donné le renouvellement constant de personnel d'un groupe de recherche, une procédure standard d'opération de chantier est fondamentale pour guider les activités d'entretien sur le terrain. Un guide standard permet que les tâches soient exécutées par n'importe qui, toujours de la même façon, et en conservant la rigueur nécessaire.

Dans ce but, le « Guide de visite au chantier » est élaboré pour fournir les renseignements d'exécution de plusieurs activités sur le terrain, d'entre eux : l'enregistrement de données acquis par l'instrumentation; la collecte des eaux et sols de surface pour l'analyse chimique de contamination; l'entretien de la végétation; la saturation des tensiomètres; l'entretien des stations météorologiques; et la préparation du plan expérimental nécessaire pour la saison d'hiver. Il est important à remarquer que ce guide ne doit pas être définitif et immuable. Des mises à jour seront nécessaires en fonction des adaptations et changements de terrains qui se passeront à l'avenir.

4.4 Solution de problèmes et améliorations

L'implantation d'un projet, même si bien conçu, probablement affrontera des imprévus qui demanderont des solutions et perfectionnements. Cette affirmation est aussi applicable à ce projet de recherche. Dans ce contexte, cette section se concentre sur les inconvénients franchis lors des étapes de construction et opération du plan expérimental et les changements mis en œuvre pour l'adaptation des plans et des procédures à la réalité de terrain.

4.4.1 Excès de l'eau sur le terrain de base des lysimètres

Au cours de l'étape d'excavation du terrain, une accumulation est observée sur la surface du sol comme montré par la Figure 4.29. La probable explication est liée à la capacité d'emmagasinement du matériau de la couverture existante (le fond de l'excavation atteint approximativement le milieu de l'épaisseur de la couverture). En suivant l'expertise des professionnels impliqués dans la construction, une adaptation de drain français (Figure 4.30) a été installée autour du périmètre des lysimètres pour évacuer l'eau que s'accumule.



Figure 4.29 - Accumulation d'eau à la surface



Figure 4.30 - Drain de fond des cellules

Ce drain extérieur (appelé dans ce projet comme drain de la cellule) a un double effet positif. Au-delà d'éviter des pressions de soulèvement sur la base de la geomembrane, il peut créer une condition limite favorable au fonctionnement du lysimètre. Étant donné que le drain est sous la pression atmosphérique, il entraîne une succion nulle au niveau de la base tout autour du lysimètre. De cette façon, les pressions sont égalisées soit à l'intérieur soit à l'extérieur du lysimètre. Ce changement a des implications avantageuses sur la performance des lysimètres et peut devenir une contribution significative pour la conception d'autres projets.

4.4.2 L'eau de ruissellement

Deux changements ont été réalisés pour le système de drainage et de quantification de l'eau de ruissellement. Le premier problème est lié au mécanisme de captation de l'eau qui ruisselle sur la surface des lysimètres. La configuration initiale du drain était un drain français construit avec du géotextile, du gravier et un tuyau 4'' perforé, comme montré par les Figure 4.31 et Figure 4.32. Cependant, après un mois de fonctionnement des lysimètres, le système ne captait aucun volume d'eau malgré les événements constants de pluie. Après réflexions du groupe, il est constaté que la perméabilité du sol en dessous du drain était relativement élevée, alors, l'eau percolait vers le fond de la cellule au lieu de s'accumuler et rentrer dans le drain.



Figure 4.31 - Exécution du drain de surface



Figure 4.32 - Drain de surface

Dans ce contexte, un autre système de drainage a été installé. Le nouveau drain est constitué d'une gouttière remplie de gravier placée directement sur la couche superficielle de terre végétale. Les gouttières conduisent l'eau vers un exutoire (Figure 4.33 et Figure 4.34) connecté au tuyau responsable pour amener l'eau vers le baril réservoir. Il faut remarquer que le deuxième système de drainage de surface (Figure 4.35) a été testé premièrement pour le lysimètre L4 à la date de 23-08-2018. Après la validation de son applicabilité et fonctionnement lors d'un événement de pluie, le drain est adapté aux autres lysimètres à la date de 30-08-2018.

Un deuxième changement est implémenté concernant à la comptabilisation de l'eau ruisselé dans les barils (Figure 4.36). L'idée initiale d'opération prévoyait la quantification de l'eau de surface par la comptabilisation manuelle. En fonction de la section transversale du baril et de la hauteur d'eau cumulée, il serait possible l'estimation du volume total capté.



Figure 4.33 - Exécution de l'exutoire



Figure 4.34 - Exutoire finalisé avec gravier



Figure 4.35 - L'ensemble du nouveau système de drainage de surface

Cependant, cette procédure ne permet pas l'obtention du débit de ruissellement en fonction du temps, comme est réalisé pour la percolation de fond des lysimètres. Dans ce contexte, de nouveaux compteurs basculants (Figure 4.37) ont été installés à la fin d'hiver 2019 en vue de compléter les données nécessaires pour la calibration du bilan hydrique de terrain à l'avenir.



Figure 4.36 - Baril pour l'eau de surface



Figure 4.37 - Tipping bucket installé

4.4.3 Réparations globales après l'hiver

L'hiver est une saison sévère au Québec. Au-delà du froid extrême qui dérange le fonctionnement de certains instruments, certaines périodes peuvent cumuler trop de neige (Figure 4.38). Dans ce contexte, plusieurs éléments du plan expérimental ont été endommagés (Figure 4.39). Alors, la reprise des activités de terrain exige des réparations pour l'année de 2019. À l'occasion des corrections, le groupe de recherche profite l'expérience acquise pour inclure des améliorations du plan expérimental pour qu'il soit plus adapté aux conditions hostiles de futurs hivers.



Figure 4.38 - Cumulation de neige hiver 2018/2019



Figure 4.39 - Équipements enfouis dans la neige

Comme montré à la sous-section 4.4.2, les tipping buckets ont été installés pour la comptabilisation de l'eau de surface. Le nivellement des barils devient fondamental pour assurer le bon fonctionnement de l'instrument. Dans ce contexte, de nouvelles bases plus solides (construits avec le bois 4x4'' traité) ont été installées, en prévoyant une couche drainante à la base (en gravier) pour évacuer l'eau plus facilement lors du dégel (Figure 4.40 et Figure 4.41). En plus, les barils sont attachés à des ancrages (à l'aide de ceintures) pour créer une stabilité contre les vents, ainsi qu'à la neige (Figure 4.42).

Un principe similaire a été appliqué aux chaudières de protection des tipping buckets qui mesurent l'eau de percolation des lysimètres. Les bases, qui au départ ont été construites en bois non traité, à ce moment sont remplacés pour une dalle en béton assise sur une couche drainante, comme présenté par les Figure 4.43 et Figure 4.44. Étant donné que les bases en béton sont plus

régulières, elles facilitent le nivèlement des chaudières. La couche drainante vise aussi réduire les dénivellements causés par des tassements du sol quand il est trop saturé.



Figure 4.40 - Base en bois traité



Figure 4.41 - Couche drainante



Figure 4.42 - Ceinture de stabilité



Figure 4.43 - Préparation de la couche drainante



Figure 4.44 - Nouvelle base en béton

Il est à noter que plusieurs tuyaux du plan expérimental ont été brisés en fonction du poids de neige cumulée sur eux (Figure 4.45 et Figure 4.46). Dans ce contexte, des renforcements en bois en format de fourchettes ont été conçus (Figure 4.47) pour augmenter le nombre d'appuis au long des tuyaux, et de cette façon réduire leurs flèches. En plus, plusieurs tubes de drainage construits initialement en PVC et ABS ont été remplacés par des tuyaux flexibles (Figure 4.48), en considérant qu'ils sont plus convenables pour résister le froid. D'ailleurs, les tuyaux flexibles permettent une manipulation plus pratique dans le cas d'une nouvelle réparation.



Figure 4.45 - Tuyaux en PVC brisés



Figure 4.46 - Tuyaux en ABS brisés



Figure 4.47 - Appui en bois en format de fourchette



Figure 4.48 - Nouveaux tuyaux flexibles

L'accumulation de neige a causé des petits tassements qui ont légèrement déformé la surface du sol des cellules. Alors, une régularisation (Figure 4.49) a été réalisée à l'aide d'un niveau laser pour assurer la pente de ruissellement de 2% définie dans la conception. L'ajout de terre végétale a été fait dans certaines régions plus déformées des cellules. En plus, les gouttières ont été nettoyées pour enlever les sédiments que colmataient les graviers et l'exutoire (Figure 4.50).



Figure 4.49 - Régularisation de surface



Figure 4.50 - Nettoyage des drains de surface

D'ailleurs, la neige a contribué directement à l'interruption de l'acquisition de lectures des sondes de teneur en eau qui fonctionnaient pendant l'hiver. Le poids de la neige a débranché certains câbles des boîtiers. Premièrement, les câbles sont rebranchés et tous les portes des data loggers sont vérifiés de façon à suivre l'emplacement définit en 2018 (Figure 4.51). Ensuite, comme amélioration tous les câbles des instruments ont été fixés à un poteau en bois pour éviter la répétition du même problème aux autres boîtiers (Figure 4.52).



Figure 4.51 - Câbles rebranchés aux portes



Figure 4.52 - Câbles attachés au poteau en bois

4.4.4 Procédure de saturation du tensiomètre T4e

Précédemment à l'installation des tensiomètres sur le terrain, ils ont été saturés en laboratoire selon une méthode qui utilise une pompe à vide mécanique. Pourtant, le fonctionnement de T4e prévoit de nouvelles saturations sur le terrain occasionnellement. Il est à noter que le critère de vérification de la saturation n'est pas bien défini dans le manuel de l'instrument.

La première méthode de saturation au chantier a été établie selon certains renseignements du manuel d'utilisation et aussi basée sur l'expérience acquise en autres projets du groupe de recherche. La méthode consiste à vérifier la présence de petites bulles d'air par la circulation de l'eau (désaère par l'échauffement sur le terrain) à l'aide d'une seringue. La circulation de l'eau est faite jusqu'au point où les bulles ne sont plus observées dans le tube métallique de sortie du tensiomètre. La Figure 4.53 exemplifie l'application de la méthode.



Figure 4.53 - Première méthode de saturation des T4e

Des erreurs successives ont été commises étant donné qu'après l'installation des tensiomètres l'intervalle entre saturations a été long et que l'efficacité de la méthode n'a pas été validée durant toute la période de fonctionnement avant l'hiver (saison où les tensiomètres sont enlevés). À partir de novembre 2018, les données de succion ont été traitées pour l'analyse préliminaire de performance des tensiomètres. La Figure 4.54 présente les graphiques des lectures de succion pour chaque tensiomètre des 4 lysimètres. Il faut remarquer que les lectures de succion sont enregistrées toutes les 30 minutes et ultérieurement traitées en moyennes journalières.

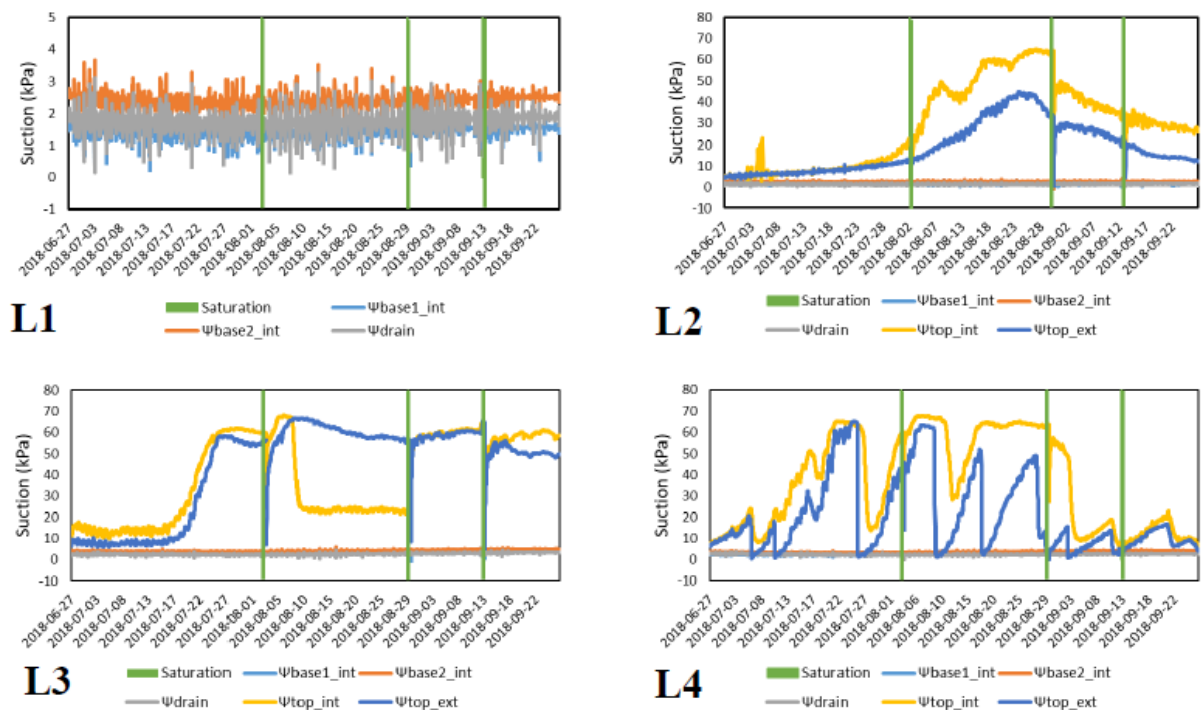


Figure 4.54 - Valeurs de succion enregistrées pour les 4 lysimètres en 2018

Les lignes vertes représentent les journées de saturation de tensiomètres sur le chantier. Il est à noter que les tensiomètres placés à la base des lysimètres présentent peu de variation de succion, étant donné qu'à ce niveau plus profond le sol est constamment saturé. En revanche, les tensiomètres au niveau de la bouche des lysimètres sont plus sensibles aux variations climatiques dû au fait qu'ils sont proches de la surface (évapotranspiration). Il est observé que dans certains moments où la saturation est faite, les valeurs de succion chutent pratiquement à zéro, ce qui indiquerait une bonne saturation des tensiomètres. Cependant, ce comportement n'est pas observé pour tous les instruments en tout temps. Il est évident que les courbes jaune et bleu (relatives aux tensiomètres à l'intérieur et à l'extérieur au niveau de la bouche des lysimètres) présentent une tendance de comportement similaire pour certains intervalles. Pourtant, les comportements changent soudainement (en L2, L3 et L4) à certains moments. Cela peut être expliqué par une méthode inefficace de saturation ou même par la basse fréquence d'application de cette méthode sur le terrain.

Des analyses faites en laboratoire montrent que malgré la circulation de l'eau avec à l'aide de la seringue, il est possible qu'une grande bulle d'air soit emprisonnée dans la pointe (en pierre poreuse) de l'équipement. Ceci est suffisant pour entraîner des erreurs de lecture. Dans ce contexte, la méthode de saturation a été réévaluée en laboratoire puis modifiée. En plus, la période de saturation est établie comme hebdomadaire. La nouvelle méthode est faite à l'aide d'une pompe à vide manuelle. L'eau est injectée à l'entrée des tensiomètres en même temps que la pompe entraîne le vide à la sortie de l'instrument pendant un intervalle de 2 minutes.



Figure 4.55 - Nouvelle méthode de saturation à l'aide d'une pompe à vide

Il faut aussi souligner qu'actuellement l'eau utilisée pour la saturation est distillée et désaérée en laboratoire. La méthode est appliquée en 2019 puis les résultats sont évalués graphiquement pour sa validation. La figure présente des lectures de succion (2019) pour les 4 lysimètres.

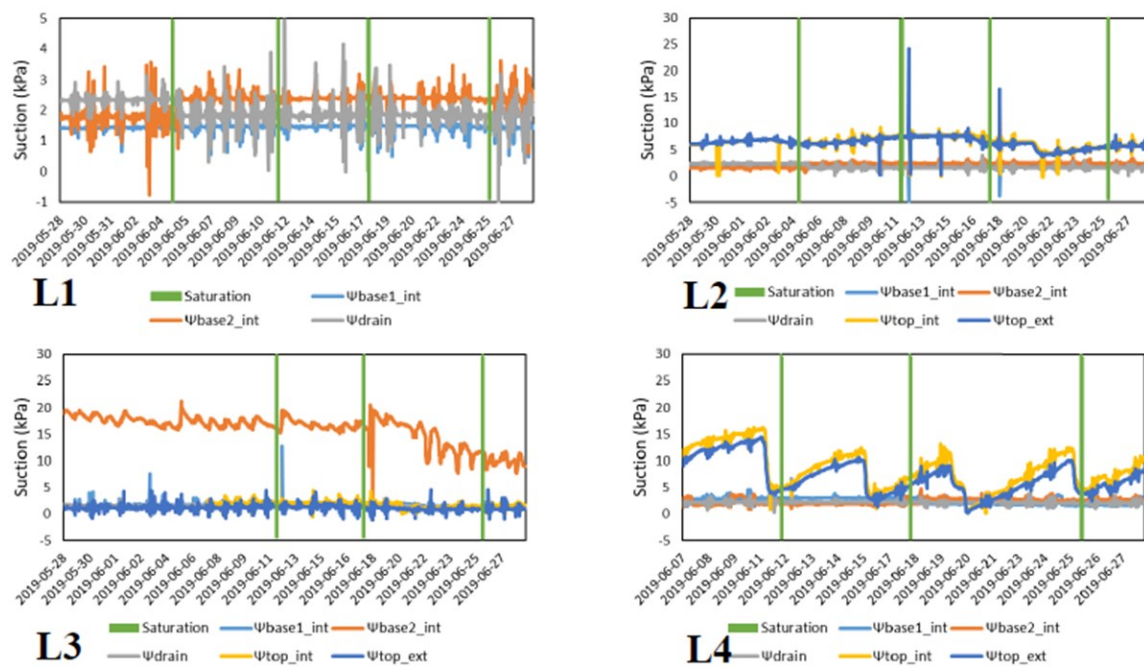


Figure 4.56 - Valeurs de succion enregistrées pour les 4 lysimètres en 2019

Il est à noter que le comportement des courbes en 2019 semble être plus cohérent après le changement de la méthode de saturation. Les valeurs de succion des tensiomètres au niveau de la bouche des lysimètres suivent le même comportement dans la période analysée. L'exception est montrée par le lysimètre L3. Un tensiomètre de la base présente des lectures de succion inattendues (autour de 20 kPa). Il est probable que soit un mal fonctionnement occasionné pour une saturation insuffisante ainsi qu'une autre raison quelconque qui doit être investiguée. En bref, les données préliminaires sont satisfaisantes et suggèrent que la nouvelle méthode de saturation demeure applicable.

4.4.5 Influence solaire sur les lectures du DL6

Les données de succion mesurées par les tensiomètres sont enregistrées dans le data logger DL6 (sous-section 3.5.2). Le téléchargement est réalisé à l'aide du logiciel DeltaLink développé par le fabricant. Au moment du téléchargement des données, le logiciel présente un graphique des lectures des tensiomètres sur l'écran, comme montré par la Figure 4.57. Lors des analyses préliminaires de succion, un comportement curieux s'est présenté : à certaines périodes de la journée, une intense variation de lectures se produit. Il est à remarquer que cette variation des lectures se répète tous les jours et semble avoir un comportement standard. Globalement, les distorsions observées se passent à partir de 6 h du matin jusqu'à 20 h (Figure 4.57).



Figure 4.57 - L'écran avec les lectures de succion fournies par DeltaLink

Dans ce contexte, la première hypothèse pour la cause du problème est l'influence solaire. Les boîtes de protection des DL6 sont fabriquées en métal et peinturées en noire (Figure 4.58). Il est considéré qu'elles ont un potentiel d'absorption de la chaleur externe qui, en conséquence, contribue à l'augmentation de la température des boîtiers (condition inadéquate pour des équipements électroniques). À partir de cette prémisse, une protection thermique est faite avec des plaques de polystyrène revêtues d'une pellicule réfléchissante (Figure 4.59). En effet, il est constaté sur le terrain que la température interne de la boîte de protection a diminué significativement. Pourtant, la distorsion des lectures perdure, malgré l'intervention.



Figure 4.58 - Boite en métal et peinture noire



Figure 4.59 - Protection thermique de la boîte

Un deuxième indice change l'approche d'analyse du problème. La période entre le 13-06-2019 et 17-06-2019 montrent des distorsions de différentes intensités pour chaque jour. Il faut remarquer qu'aux dates de 13 et 15 juin les variations de lectures sont pratiquement négligeables, même si les températures sont approximativement égales aux autres journées. Alors, la suspecte se dirige vers la radiation solaire plutôt que la température. Dans ce contexte, les mesures de radiation solaire fournies par les stations météorologiques de terrain sont utilisées pour l'étude du problème. Par la Figure 4.60 il est notable les journées où la distorsion des lectures est plus intense, la radiation solaire journalière moyenne et plus forte et vice-versa.

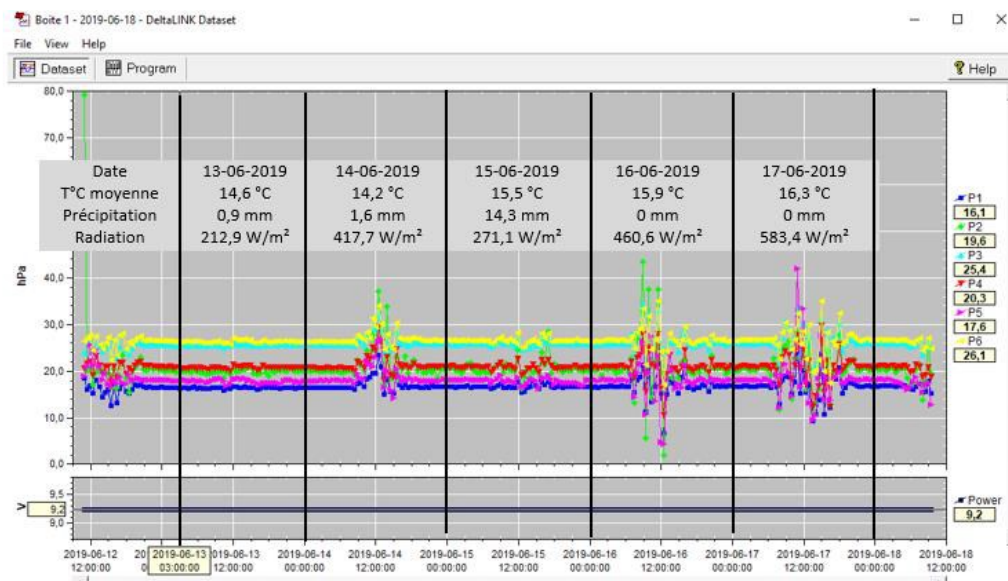


Figure 4.60 - Comparaisons entre les distorsions de lecture, température et radiation solaire

Pour compléter l'étude du problème, une deuxième analyse est réalisée par la comparaison de la radiation horaire entre la journée de distorsion plus petite (soit le 13-06-2019) et celle de plus intense variation de lecture (soit, le 17-06-2019). La Figure 4.61 montre qu'à la date de 13 juin, la valeur de radiation plus intense enregistrée a été de 400 W/m². En revanche, en 17 juin les radiations ont atteint la valeur maximum de 1000 W/m². Évidemment, il est confirmé que la source du problème de distorsion des lectures de succion est la radiation solaire.

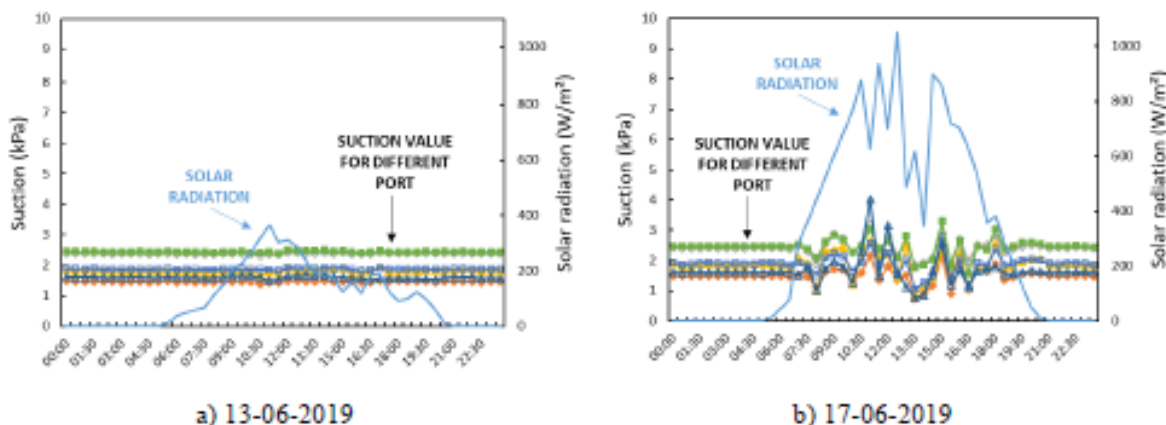


Figure 4.61 - Comparaison de la radiation horaire entre deux jours spécifiques

Cependant, la compréhension du problème n'est pas encore terminée. En sachant que la radiation solaire est la source du problème, il est nécessaire d'identifier comment elle affecte les tensiomètres. Autrement dit, il faut vérifier si le problème est l'incidence des rayons solaires sur : les câbles de données; où sur les câbles métalliques de saturation; ou si la protection en polystyrène faite sur la boîte n'est pas suffisante. Il est suggéré pour la continuation du projet la réalisation des tests sur le terrain. Par exemple, certains câbles de données peuvent être protégés par des bandes réfléchissantes pour la comparaison des lectures avec les câbles non protégés. Un autre aspect à considérer est l'estimation du seuil de radiation à partir duquel l'interférence se produit. Ceci est important pour distinguer les distorsions des lectures des variations de succion occasionnée par des changements, en fait, des pressions dans le sol. Il faut remarquer que pour l'analyse préliminaire de données faite au chapitre 5, le traitement des données considère l'élimination systématique des valeurs mesurées entre 6 h et 20 h. Cependant, cette méthode n'est pas idéale et peut entraîner des erreurs. Alors, le traitement des données doit être peaufiné pour les futurs travaux du groupe de recherche.

5 Suivi de fonctionnement et interprétation de données

Ce chapitre concerne à l'évaluation de performance du plan expérimental en examinant des données acquises par l'instrumentation lors du fonctionnement des lysimètres. Les sections suivantes présentent : le comportement général du fonctionnement individuel de chaque type d'instrument; la vérification de cohérence des données faite par la comparaison entre les résultats de différents instruments; l'étude des propriétés hydrauliques des sols à l'échelle de terrain en considérant des valeurs de succion et teneur en eau des sondes placées dans un même sol. En plus, une analyse préliminaire concernant la percolation de terrain et de contamination des eaux de surface est réalisée en vue de répondre les besoins du partenaire industriel, WM.

5.1 Validation de performance de l'instrumentation

Les analyses suivantes correspondent aux données enregistrées dans un intervalle d'une année, à partir du moment où la majorité des instruments avait l'acquisition en cours, soit la période de 29-06-2018 au 28-06-2019. Il est à noter que cette période est primordiale pour la suite du projet puisque les réponses futures dépendent du fonctionnement adéquat du plan expérimental. Alors, l'objectif central de ce mémoire est d'assurer que le plan expérimental est bien construit et muni d'une instrumentation fonctionnelle, c'est-à-dire l'instrumentation fournie des données satisfaisantes soit quantitativement soit qualitativement.

5.1.1 Conformité générale de l'acquisition des données

Le fonctionnement de tous les instruments est validé par l'analyse graphique des données enregistrées. Les graphiques globaux de précipitation, percolation, teneur en eau et succion sont présentés séparément pour chaque lysimètre dans l'Annexe 8.2. Évidemment, l'instrumentation a présenté certains problèmes ponctuels d'enregistrement au cours de la première année, ce qui est attendu pour cette période d'ajustement du plan expérimental. Les problèmes plus courants sont : le déchargement des piles, des câbles débranchés des boîtiers par l'action des vents ou le poids de neige sur les fils, et les interférences climatiques comme le froid intense ou la chaleur excessive. Tous ces types des problèmes entraînent des interruptions de lectures observés aux graphiques (discontinuité des courbes). Pour le contrôle de qualité des informations, les périodes

sans lecture d'un équipement sont enregistrées dans un fichier qui fait l'identification des problèmes pour leur évaluation et l'adoption de solutions de réparation et même pour actions préventives qui perfectionnent les activités futures de terrain (voir l'annexe 8.3).

D'ailleurs, il faut souligner un moment spécifique où les instruments sont arrêtés pour une période plus significative de temps, soit la période de 13-10-2018 au 24-10-2018. Tous les instruments ont été débranchés à l'avance pour éviter l'hiver. Cependant, le groupe de recherche a constaté que certains instruments peuvent fonctionner pendant cette saison. Alors, à partir du 24 octobre ils sont réinstallés. Les seuls instruments qui ne peuvent être exposés au froid intense sont les tensiomètres. Étant donné que les T4e opèrent saturés avec l'eau, les températures au-dessous de zéro produisent le gel qui peut endommager l'équipement. Alors, les tensiomètres sont enlevés avant l'hiver et réinstallés à la fin du printemps, lors du dégel.

Malgré les inconvénients franchis, les instruments ont une réponse générale adéquate. Ils fournissent des valeurs dans l'ordre de grandeur compatible avec leur emplacement et les données climatiques. Par exemple, les sondes de teneur en eau réagissent de façon inversement proportionnelle aux tensiomètres. Autrement dit, la teneur diminue quand les suctions augmentent, ce qui est attendu en considérant le comportement hydraulique décrit par la CRE. Ensuite, il est possible à remarquer que les tipping conteurs présentent des mesures significatives de percolation pour les périodes de précipitation plus fréquentes ou lors d'un dégel, ce qui est fortement plausible avec la réalité de terrain.

Les sondes de teneur en eau installées proche de la surface fournissent des réponses oscillatoires. Cet effet est prévu vu que les couches de surface sont sensibles aux changements atmosphériques. C'est-à-dire, à ce niveau les réponses sont plus immédiates à la variation de température et précipitations. Les résultats montrés par la Figure 8.5 valident la sensibilité des 5TM pour capter ce comportement de surface.

L'évaluation faite dans cette sous-section est un aperçu plus général utilisé pour la validation de la conformité globale de l'instrumentation. Les relations entre lectures des différents instruments et les analyses plus spécifiques seront présentées dans les prochaines sous-sections

5.1.2 Données météorologiques

L'étude du bilan hydrique du terrain dépend notablement des données acquises par les stations météorologiques. Les informations qu'elles fournissent concernant la précipitation, la température, la vitesse de vents et la radiation solaire, conjointement aux caractéristiques de la végétation, sont des conditionnalités à l'estimation de l'évapotranspiration, par exemple.

Il faut remarquer que la précipitation fonctionne comme la recharge hydraulique du système et qu'elle exerce une influence directe sur la percolation. Dans ce contexte, la précipitation est le paramètre météorologique dont l'évaluation se concentre dans ce mémoire. En effet, le modèle de station utilisé dans ce projet n'est pas conçu pour mesurer la quantité de neige précipitée. Alors, il est plus précis de dire que les stations installées font la mesure de la pluviométrie plutôt que la précipitation. Cependant, une complémentation des données de précipitation est faite pour la période d'hiver par le biais de mesures de la couverture de neige sur le site d'enfouissement. Étant donné que l'hiver 2018 a été une période d'apprentissage et adaptation de la méthode de mesure de la neige, les résultats ne sont pas suffisants pour être abordés à ce moment.

La Figure 5.1 présente les graphiques des données fournis par les stations météorologiques de terrain en comparaison à ceux provenant de la banque de données de l'Environnement Canada (sous-section 3.4.2.1) pour la même période. Le premier point à remarquer est que les deux stations Davis présentent des données incomplètes pour certaines périodes. De cette façon, les graphiques montrent des espaces parmi les mesures, qui ne sont pas cohérentes avec les données de l'Environnement Canada. Occasionnellement, l'enregistrement de données a été interrompu dû à des problèmes de batterie ou de communication avec la console (Tableau 5.1). D'ailleurs, dans les journées de précipitation de neige les stations n'enregistrent pas des valeurs tandis que l'Environnement Canada fournit des mesures de neige converties en précipitation d'eau.

Malgré les problèmes, dans les périodes de bon fonctionnement, l'allure des graphiques est semblable. Les stations captent des mesures de pluie dans le même ordre de grandeur que la référence à St-Germain. De petites différences des valeurs existent, pourtant, l'emplacement des instruments n'est pas le même. Pour exemplifier la cohérence des données, il est à noter la

période décembre à janvier où les graphiques mettent en évidence la capacité des stations de capter le dégel qui s'est produit.

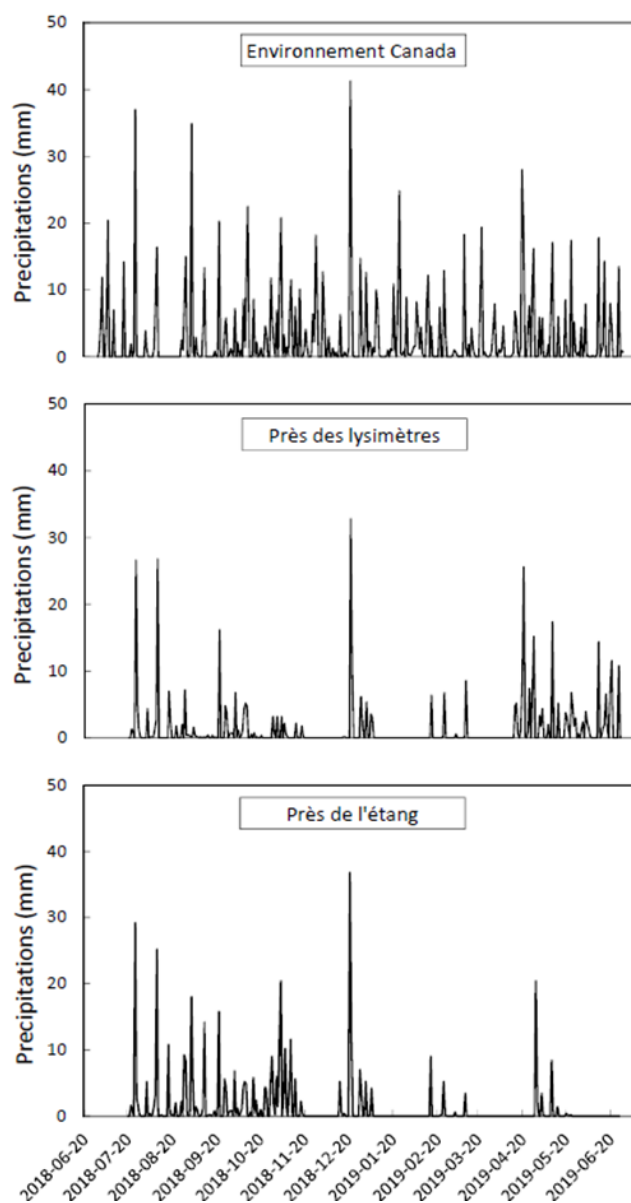


Figure 5.1 - Graphique de la précipitation/pluviométrie de la période d'analyse

Dans ce contexte, il est possible à considérer les données de précipitation de l'Environnement Canada comme représentatives du terrain. Étant donné qu'ils sont plus complets pour la période étudiée, ils seront utilisés pour les analyses comparatives de succion et teneur en eau dans les prochaines sous-sections.

Tableau 5.1 - Périodes de non-conformité du fonctionnement des stations Davis

Station	Début	Arrêt	Commentaires
Station 1	2018-10-11	2018-10-11	Pas de prise de lecture pour le 2018-10-11
	2018-11-24	2018-12-12	Problème de batteries
	2018-12-13	2018-12-15	Données aberrantes pour la température
	2019-01-10	2019-02-14	Problème de batteries
	2019-03-14	2019-04-10	Problème de batteries
	2019-05-09	2019-05-09	Pas d'enregistrement pour cette journée
Station 5	2018-10-11	2018-10-11	Pas de prise de lecture pour le 2018-10-11
	2018-11-24	2018-12-12	Problème de batteries
	2019-01-10	2019-02-04	Problème de batteries
	2019-03-10	2019-03-10	Pas d'enregistrement pour cette journée
	2019-03-14	2019-04-28	Problème de batteries
	2019-05-25	2019-06-25	Problème de batteries

5.1.3 Succion

Cette sous-section présente des analyses plus spécifiques concernant la cohérence de réponse des tensiomètres en fonction de la précipitation pour les différents lysimètres du projet. Il est à noter que l'analyse ne considère pas les données de L1 dû au fait qu'il a seulement des tensiomètres installés à la base (Figure 3.18) ce qui limite des conclusions.

Il serait aussi intéressant d'observer le rapport entre les tensiomètres placés à la base et les données de percolation fournies par les compteurs basculants. Au-delà de valider le fonctionnement de ces tensiomètres, cette relation peut clarifier le mécanisme de drainage des lysimètres et le jeu de la couche drainante dans ce contexte. Cependant, les données obtenues pour le moment sont insuffisantes pour une analyse conclusive.

La première analyse graphique est faite en comparant la succion mesurée à la bouche du lysimètre est celle à la base (du tensiomètre plus profond) pour une certaine période d'acquisition. Il est observé que pour L2 et L4 (Figure 5.2 et Figure 5.4) la valeur de succion est moins élevée que celle à la bouche du lysimètre. Ce comportement est cohérent étant donné qu'il existe une cumulation de l'eau à la base du lysimètre qui entraîne la réduction de succion.

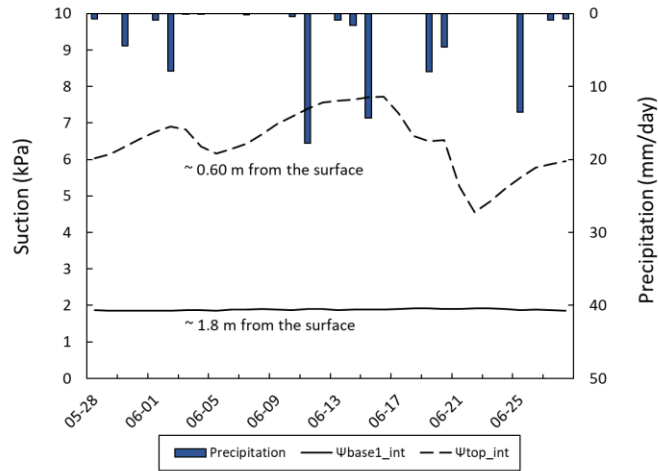


Figure 5.2 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L2

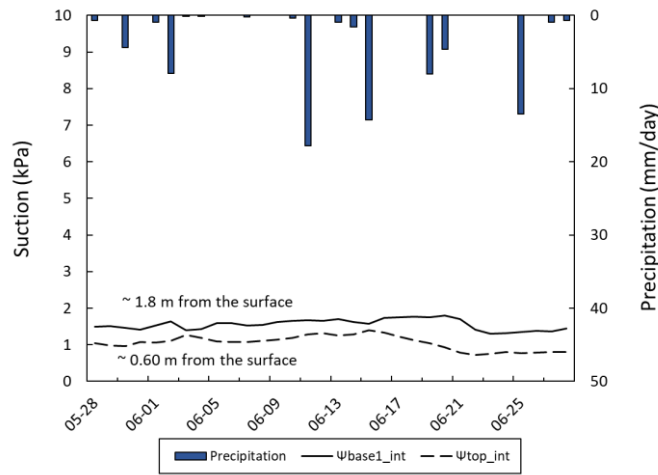


Figure 5.3 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L3

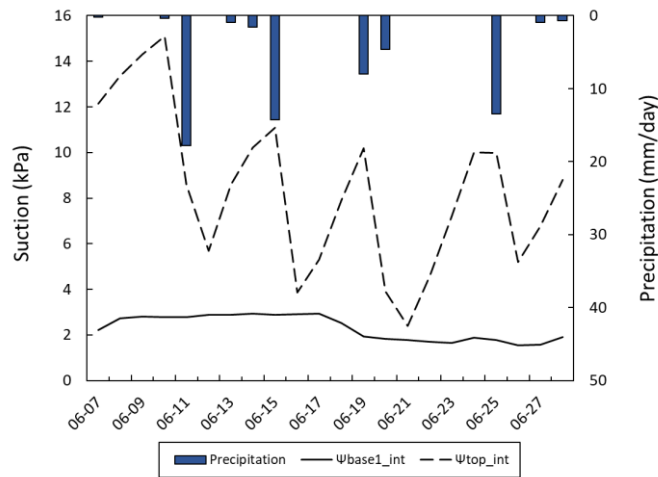


Figure 5.4 - Comparaison entre 2 sondes de succion à différentes profondeurs et les précipitations pour le L4

En plus, les lysimètres L2 et L4 montrent une réponse adéquate des tensiomètres en fonction de la précipitation. Pour les journées plus sèches, la succion présente une tendance d'augmentation tandis que lors d'une pluie les valeurs de succion diminuent, surtout pour les tensiomètres de la bouche. Il faut remarquer que pour L2 la réduction de la succion, ensuite à un événement de pluie, présente un décalage de réponse de 1 à 2 jours tandis que pour L4 ce comportement se passe presque immédiatement. Cependant, les tensiomètres de L3 (Figure 5.3) fournissent des réponses différentes. Les valeurs de succion à la base sont plus élevées que celles observées à la bouche de lysimètres ce qui est l'inverse du comportement attendu. L'explication pour ce phénomène est encore inconnue. Une possibilité serait l'effet de barrière capillaire qui peut se produire à l'interface de la couche de sols BC avec la couche supérieure de recouvrement (Figure 3.20). Pourtant, une analyse plus détaillée est exigée pour la validation du phénomène.

Une deuxième analyse est faite par la comparaison entre les tensiomètres à la bouche, placés à l'intérieur et à l'extérieur des parois des lysimètres. Cette analyse a l'objectif d'évaluer la performance du lysimètre concernant l'effet de déviation latéral de l'écoulement. Lorsque les valeurs de succion sont égales à l'intérieur et à l'extérieur (où avec une différence négligeable), le lysimètre fonctionnerait de façon adéquate. Autrement dit, les conditions limites sont idéales pour que le lysimètre fournisse des mesures représentatives de percolation. Dans ce contexte, la comparaison de ces tensiomètres de la bouche permettrait la validation de la méthodologie de conception proposée par Parent et al [2016].

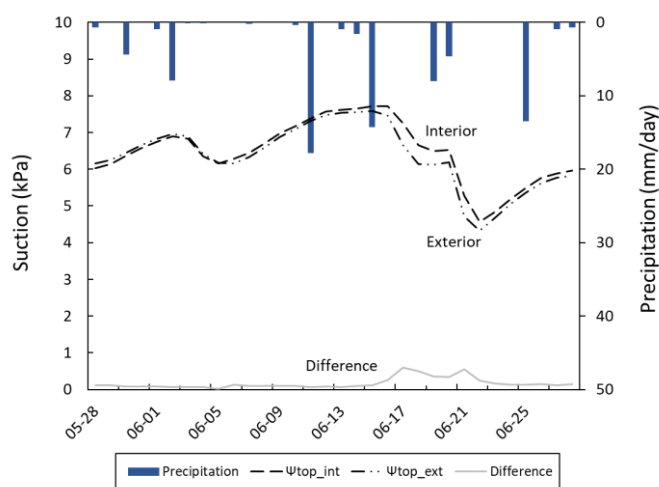


Figure 5.5 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L2

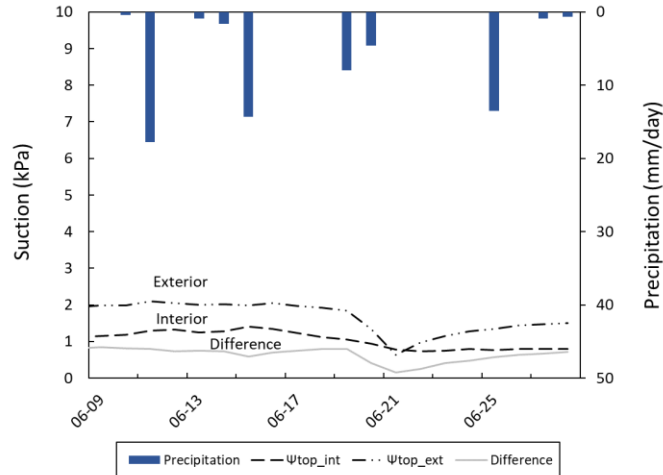


Figure 5.6 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L3

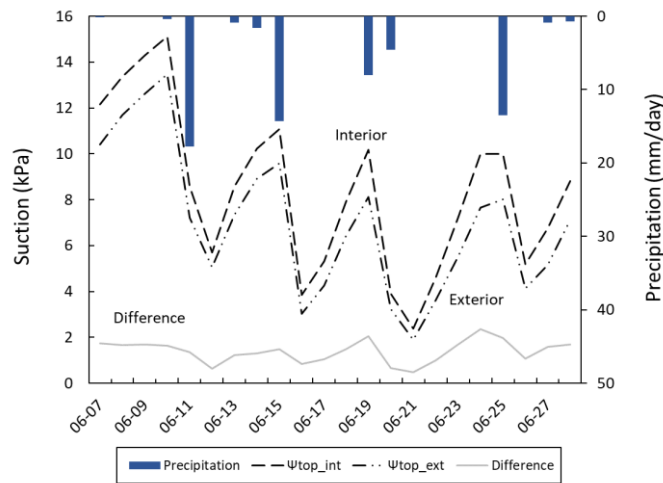


Figure 5.7 - Comparaison entre 2 sondes de succion à la bouche du lysimètre et les précipitations pour le L4

Il est à noter que L2 (Figure 5.5) présente une différence de succion presque nulle entre les deux tensiomètres à la bouche, ce qui indique que la déviation latérale est pratiquement inexistante. Alors, L2 fonctionne de façon représentative. Le comportement de L4 est aussi intéressant, étant donné qu'il confirme certaines hypothèses de fonctionnement. La Figure 5.7 montre une oscillation plus intense des valeurs de succion mesurées par les tensiomètres. Ce comportement est plausible et expliqué par le fait que ces tensiomètres (de L4) sont plus proches de la surface, alors, ils sont plus susceptibles à des variations climatiques. La réponse obtenue valide que les tensiomètres installés possèdent assez de sensibilité pour le suivi approprié des succions.

Il faut remarquer que la différence des valeurs entre les deux tensiomètres de L4 est plus considérable (dans l'ordre de 1 à 2 kPa) que celle de L2. Pourtant, cette différence est petite et probablement est dans la marge d'erreur de l'équipement. D'ailleurs, la Figure 5.7 met en évidence l'influence de la précipitation sur l'écart entre les mesures des deux tensiomètres. Il est observé que lors d'un événement de pluie la différence des valeurs de succion diminue immédiatement. Alors, ceci est un indice préliminaire qu'il existe une valeur déterminée de débit q (précipitation) à partir duquel le L4 fonctionne plus correctement.

La Figure 5.6 présente les mesures des tensiomètres au niveau de la bouche pour L3. D'abord, les valeurs de succion sont relativement faibles en comparaison avec celles de L2 et L4. Ceci est un peu illogique, dû au fait que les couches plus proches de la surface ont une tendance de sécher plus rapidement et en conséquence présentent des valeurs plus élevées de succion, au moins du même ordre de grandeur des autres lysimètres. Ensuite, il est observé que la différence de mesure entre les deux tensiomètres est constante et de l'ordre de 1 kPa.

La relation entre la succion et la précipitation n'est pas évidente comme pour les autres lysimètres. La seule période où la précipitation entraîne une réduction de la différence de succion est celle du jour 21-06-2019 à 23-06-2019, mais pour les journées subséquentes la différence revient à 1 kPa. Les données de L3 ne sont pas conclusives pour le moment, alors, il est recommandé une étude plus spécifique pour la compréhension de son comportement.

5.1.4 Teneur en eau

L'analyse des sondes de teneur en eau suit le même principe de celle réalisée pour les tensiomètres. La cohérence du fonctionnement est vérifiée par le biais de comparaisons entre les mesures de teneur en eau à la base et à la bouche des lysimètres, et la précipitation. En plus, la validation de performance des deux sondes placées à la base des lysimètres (à 0,25 et 0,35 m du fond) est faite par l'observation du comportement de la teneur en eau en fonction de la percolation mesurée par les compteurs basculants. Il faut remarquer que le lysimètre L1 ne fait pas partie de cette analyse due à des problèmes de fonctionnement de son compteur basculant.

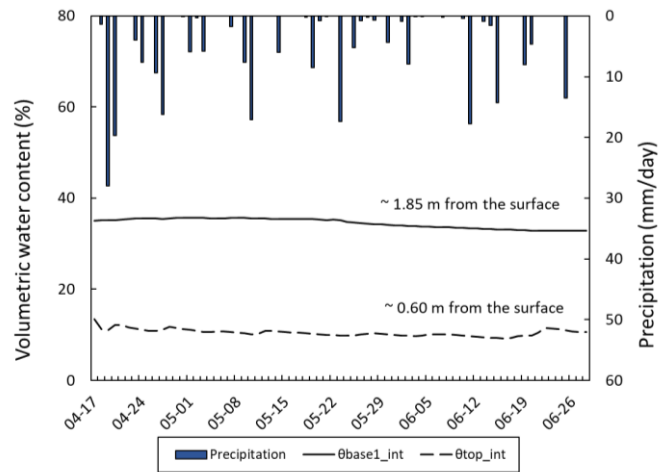


Figure 5.8 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations pour L2

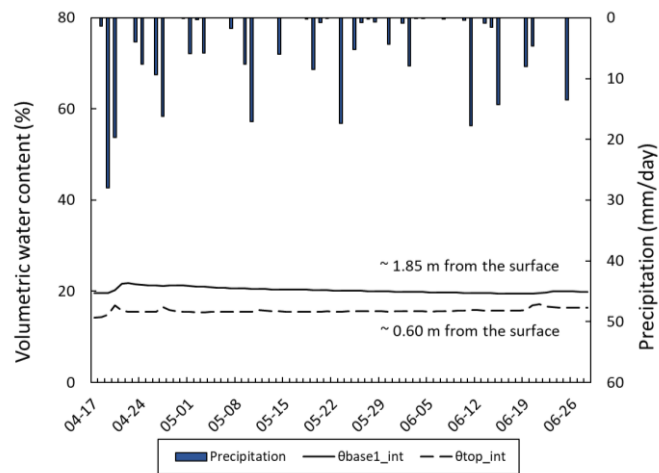


Figure 5.9 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations pour L3

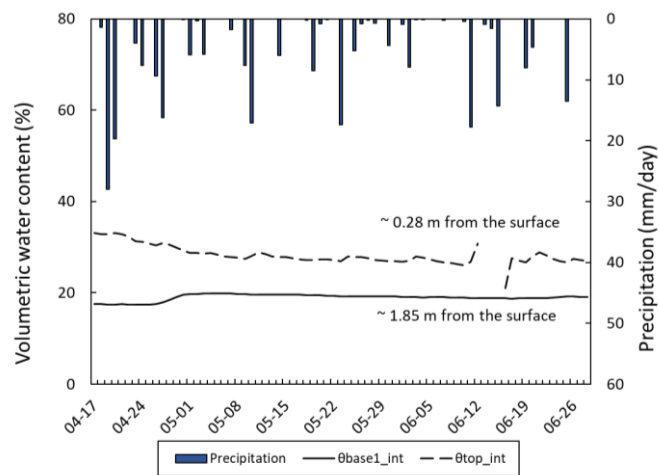


Figure 5.10 - Comparaison entre 2 sondes de teneur en eau à différentes profondeurs et les précipitations de L4

Tout d'abord, il est possible d'observer que pour L2 et L3 (Figure 5.8 et Figure 5.9) les sondes plus proches de la surface présentent des valeurs de teneur en eau plus faibles que celles du fond du lysimètre. Ce comportement est plausible dû au fait que la portion du sol proche de la surface est plus soumise à l'action de l'évapotranspiration. Alors, elle a une tendance de perdre la saturation plus rapidement. Le lysimètre L4 (Figure 5.10) présente le comportement inverse des autres. La sonde placée à la bouche du lysimètre enregistre des valeurs de teneur en eau plus élevées que celles du fond. Pourtant, ce phénomène est justifiable par la possible action de l'effet de barrière capillaire attendu pour ce lysimètre. Au niveau de la bouche de L4, le matériau de remplissage est le sol AB (Figure 3.21) qui possède une granulométrie plus fine que le sol de recouvrement sous-jacent. Alors, la couche de sol AB fonctionne comme une CRC. Autrement dit, la couche de sol AB cumule l'eau avant qu'elle percole vers la couche inférieure.

Malgré la cohérence des lectures des sondes en différentes profondeurs présentées précédemment, la relation des lectures de teneur en eau et la précipitation est moins évidente que celle observée dans le cas des tensiomètres. Lors d'une précipitation, la variation de teneur en eau observée est relativement faible et à ce moment n'est pas conclusive.

Une deuxième approche est utilisée pour la validation de la capacité des sondes de représenter adéquatement le comportement hydraulique du sol, soit la comparaison entre les valeurs de teneur en eau des sondes du fond du lysimètre et la percolation. Cette analyse permet d'attester que les sondes sont capables d'identifier les occasions de drainage des lysimètres.

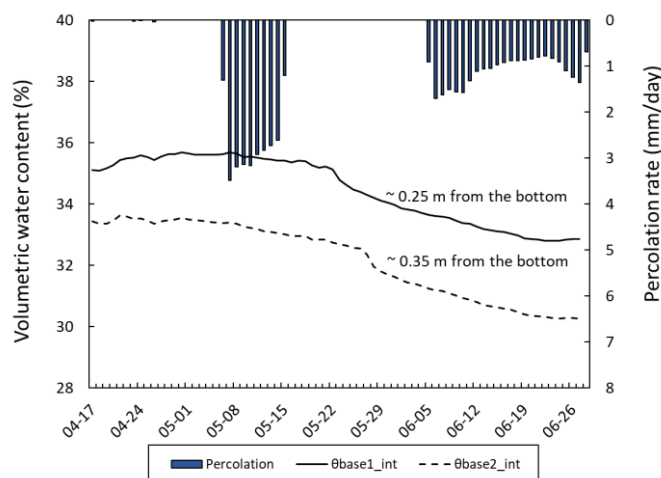


Figure 5.11 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L2

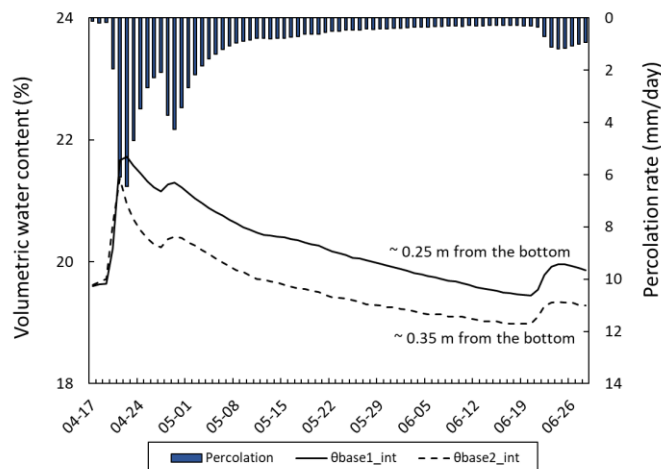


Figure 5.12 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L3

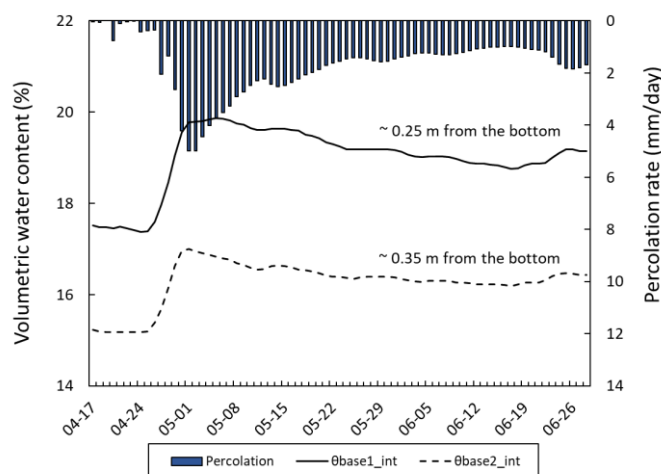


Figure 5.13 - Comparaison entre 2 sondes de teneurs en eau au fond et le taux de percolation pour le L4

Pour les trois lysimètres analysés (Figure 5.11 à Figure 5.13) les sondes plus profondes, soit à 0,25m du fond, présentent des valeurs de teneur en eau plus élevées que celles placées à 0,35 m du fond. Ceci est compatible avec le comportement attendu et dénote une percolation descendante. Il est aussi à noter que la teneur en eau diminue à la base des lysimètres proportionnellement au drainage capté au même moment par les compteurs basculants. Les courbes des graphiques L3 et L4 (Figure 5.12 et Figure 5.13) montrent que, de façon interactive, le début de la percolation se produit immédiatement après que la teneur en eau cumule à une certaine valeur. Alors, ces résultats montrent une concordance concernant l'interdépendance entre la teneur en eau à la base et le drainage des lysimètres, et valident la sensibilité des instruments pour représenter ce comportement.

5.1.5 Tassement

Comme déjà cité à la sous-section 3.5.4, un tassement significatif des couches peut entraîner un changement de densité et en conséquence il peut altérer la conductivité hydraulique du sol. Le travail de Terzaghi et Peck [1967] propose une correction de la valeur de k_{sat} en fonction du changement de densité d'un sol. Dans ce contexte, des lectures des plaques de tassements sont faites sur le terrain pour le suivi de la déformation des couches. La Figure 5.14 présente les mesures obtenues pour la première année du plan expérimental. Il est possible à noter qu'il y a de petites variations ponctuelles, mais que sont négligeables pour un changement de densité. De façon globale, il est possible à dire que les lectures sont constantes et que la correction de la valeur de la conductivité hydraulique n'est pas nécessaire pour aucun lysimètre.

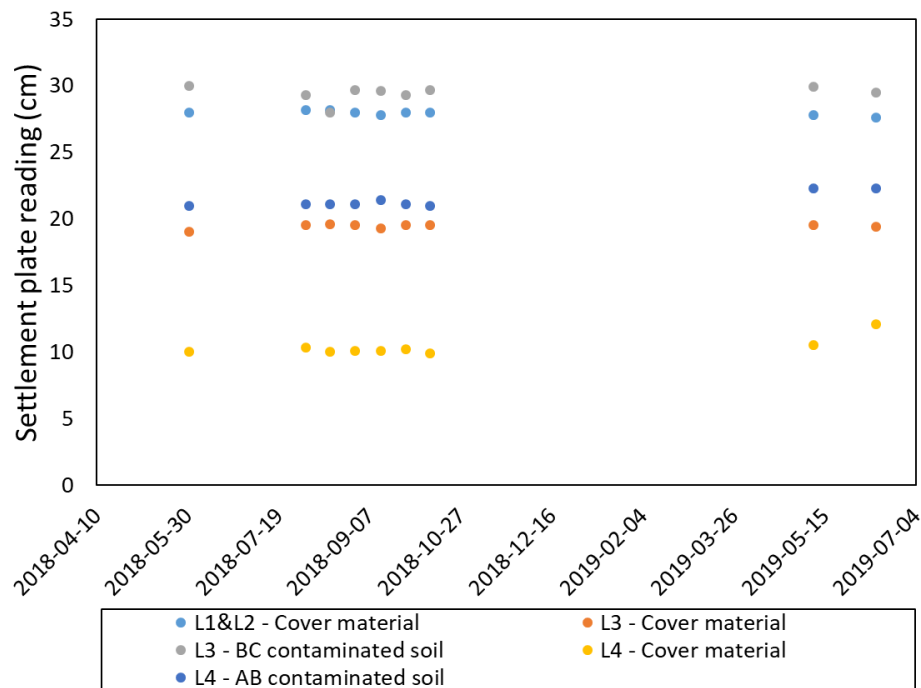


Figure 5.14 - Valeurs des lectures des plaques de tassement

5.2 Reconstitution de la CRE à l'échelle du terrain

Le chapitre 2 met en évidence que le comportement hydraulique des sols non saturés peut être représenté graphiquement par la CRE et la FCH. Dans la phase de conception du plan expérimental, les paramètres non saturés du sol ont été obtenus par des essais au laboratoire. Évidemment, les tests sont réalisés avec échantillons à moindre échelle que la réalité de terrain. De cette façon, les résultats de laboratoire ne comprennent pas certaines caractéristiques de terrain par exemple, la macrofissuration du sol, qui peut altérer globalement les paramètres hydrauliques du sol. Alors, une contre-vérification de terrain devient utile pour valider les essais de laboratoire ou indiquer la nécessité d'ajustements des paramètres utilisés pour l'obtention de la CRE et FCH. Dans ce contexte, les données de succion et de la teneur en eau mesurées en différentes profondeurs dans un même type de sols permettent la reconstitution de la CRE et en conséquence la FCH. À l'aide du fichier Excel utilisé pour le lissage de courbes (sous-section 2.2.4), il est possible d'ajuster la CRE à l'œil en faisant des changements interactifs des paramètres de Van Genuchten jusqu'à l'approximation plus adéquate aux points mesurés sur le terrain. Les sous-sections suivantes présentent les résultats obtenus pour le moment. Il est important à noter que les courbes présentées sont préliminaires, étant donné qu'une recalibration des tensiomètres sera réalisée à l'avenir. Alors, les courbes peuvent encore changer.

5.2.1 Recouvrement

La première reconstitution de la CRE du sol de recouvrement a été présentée dans l'article de Cabral *et al* [2019]. À l'occasion, le lissage considérait uniquement les points mesurés dans l'année de 2018, ce qui a produit la courbe présentée par la Figure 5.15(a). Ultérieurement, les données obtenues jusqu'à la fin juin 2019 ont été ajoutées pour le perfectionnement de la courbe, comme montré par la Figure 5.15(b).

D'abord, il est possible à remarquer que dans les deux cas présentés, les courbes reconstituées se diffèrent de la courbe de laboratoire. Le point d'entrée d'air de terrain se produit pour des succions plus petites que celle obtenue par Hyprop. Il faut aussi remarquer qu'un premier temps le plan expérimental passe par une période d'accommodation globale du système, alors, les données obtenues juste après la construction (2018) peuvent ne pas couvrir toute la réalité du

terrain. Ceci est confirmé par l'ajout des données de 2019. La Figure 5.15(b) montre que le recouvrement peut atteindre une teneur en eau saturée plus élevée, ce qui entraîne le changement de la CRE en comparaison à celle de la Figure 5.15(a). Malgré la différence entre les valeurs d'entrée d'air de la CRE reconstitué (2018/2019) et de laboratoire, le paramètre n concernant à la pente des courbes semble être relativement égal (les pentes sont parallèles à l'œil). La reconstitution de la CRE permet aussi le retraçage de la FCH, comme montré par la Figure 5.16.

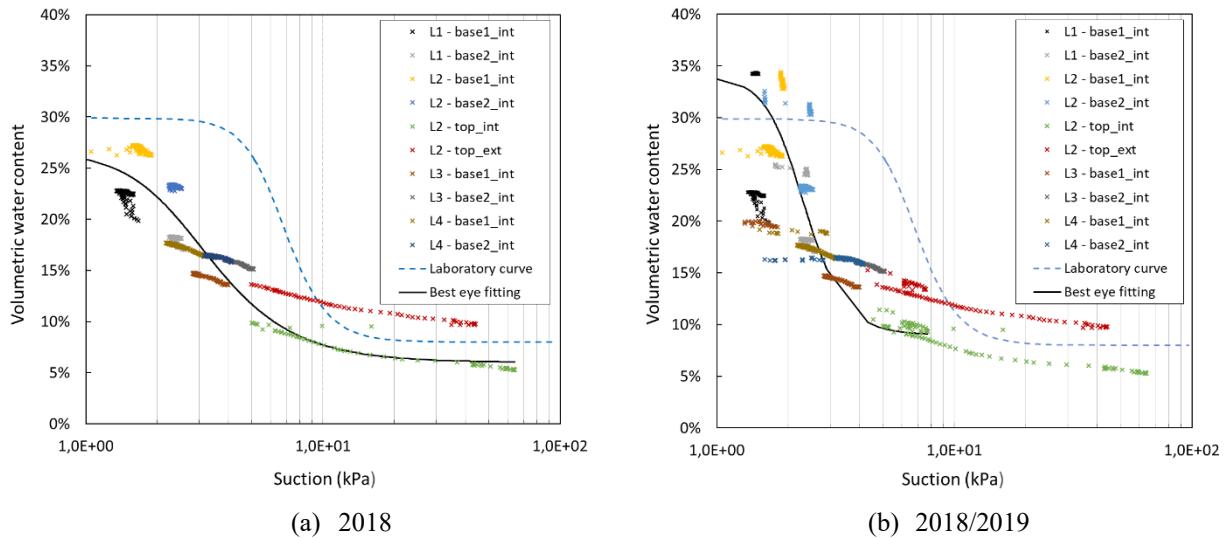


Figure 5.15 - Reconstitution de la CRE du sol recouvrement selon des mesures de terrain

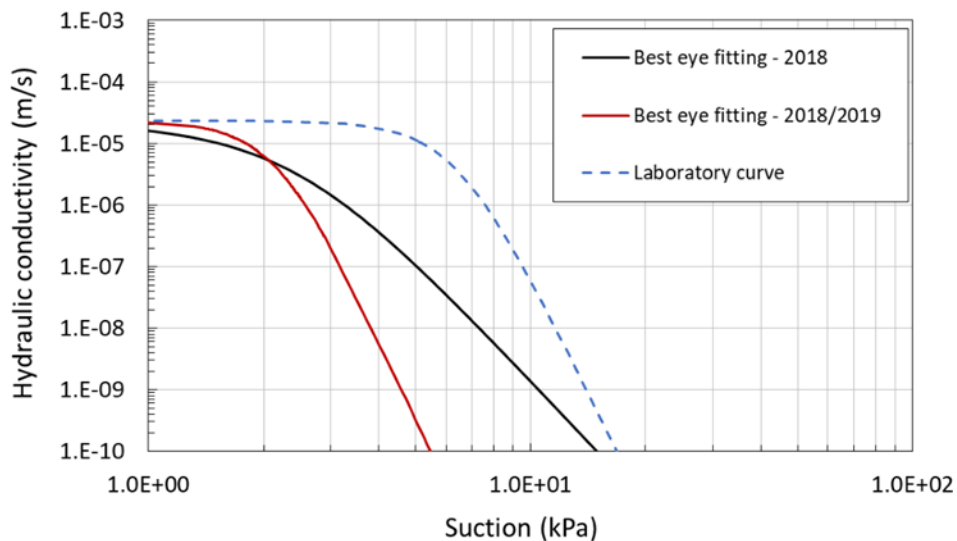


Figure 5.16 - Fonction de conductivité hydraulique pour le matériau de recouvrement

5.2.2 Sol AB et BC

La reconstitution des courbes des sols AB et BC est plus limitée étant donné que les mesures sont faites seulement au niveau de la bouche des lysimètres (Figure 3.20 et Figure 3.21). Autrement dit, les points obtenus ne couvrent pas toute la longueur de la CRE. La Figure 5.17 (a) et (b) montrent que les données mesurées jusqu'au moment ne permettent un ajuste conclusif de la CRE. Dans ce contexte, il est recommandé l'ajout des sondes de teneur en eau et tensiomètres placés à différents niveaux dans les couches des sols AB et BC pour l'obtention de valeurs plus humides qui compléteront les courbes.

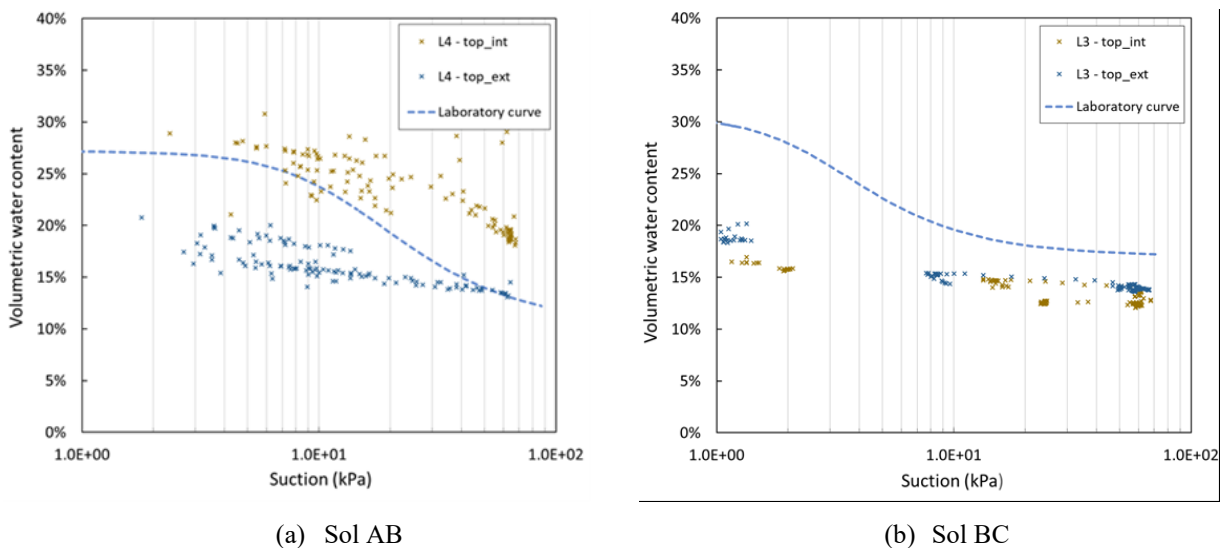


Figure 5.17 - Reconstitution de la CRE pour les sols AB et BC

En conclusion, il est possible à affirmer que l'instrumentation est capable de reproduire la reconstitution de la CRE, malgré les problèmes ponctuels franchis. Après la recalibration de tensiomètres, les courbes seront ajustées. Au-delà de la comparaison avec les résultats de laboratoire, la reconstitution est utile pour le suivi du changement de la CRE en fonction des tassements qui peuvent se reproduire à l'avenir. C'est-à-dire qu'à chaque changement de densité observé dans les couches (à l'aide des plaques de tassement), il est possible à utiliser les données de succion et de teneur en eau pour reconstituer la CRE correspondante.

5.3 Analyse préliminaire liée aux besoins du partenaire industriel

Comme dit dans l'introduction de ce mémoire, le projet des lysimètres est développé à partir d'une problématique (sous-section 1.2.1) affrontée par le partenaire industriel Waste Management (WM). Au-delà des objectifs scientifiques, les réponses de projet doivent atteindre les besoins de WM.

L'étude de la percolation est l'élément fondamental pour le contrôle de la production excessive de lixiviat. D'ailleurs, à l'occasion d'un reprofilage du terrain il est considéré l'utilisation de sols contaminés comme couverture finale du site d'enfouissement en attestant que la concentration de contaminants dans les eaux de surface ne dépasse pas les limites réglementaires.

Dans ce contexte, cette section présente les premières mesures de percolation des lysimètres et l'analyse chimique des eaux de ruissellement. Il faut remarquer que ces données sont préliminaires puisqu'ils représentent seulement la première année de projet. Pour avoir des réponses plus conclusives, il est nécessaire l'acquisition de données dans la période de 3 ans, le délai prévu pour ce projet.

5.3.1 Suivi de la contamination chimique

L'étude de contamination de surface est faite à travers de deux éléments, soit : l'analyse chimique de l'eau de ruissellement captée par les drains et retenue dans les réservoirs (barils) pour être collectée ensuite à une précipitation; et l'analyse chimique d'échantillons de sols prélevés à la surface du sol, proche à la gouttière de l'eau de ruissellement.

5.3.1.1 Analyse de l'eau

L'analyse chimique des eaux est basée sur l'article 53 du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR), qui est la régulation du Gouvernement du Québec concernant la décharge de l'eau dans l'environnement. Il faut remarquer que l'analyse est faite par un laboratoire indépendant qui nous fournit les rapports des résultats pour le suivi de contamination au long du temps. Les paramètres de contamination analysés sont : l'azote ammoniacal; les composés phénoliques; le DBO₅ (demande biochimique d'oxygène); le zinc et

les matières en suspension (MES). Le Tableau 5.2 et Tableau 5.3 montrent le registre des dates dont les l'échantillon de l'eau ont été prélevés puis envoyés au laboratoire.

Tableau 5.2 - Registre des collectes d'échantillons de l'eau pour l'analyse chimique – 2018

	Total d'échantillon	2018-08-20	2018-08-23	2018-08-30	2018-09-06	2018-09-13	2018-09-20	2018-09-27	2018-10-10	2018-10-12	2018-11-05
Eau de surface	5										
L1&L2 - Silt	4	-	-	-	X	X	-	X	X	-	-
L3 - BC	1	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-
L4 - AB	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sol	9										
L1&L2 - Silt	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-
L3 - BC	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-
L4 - AB	3	X	-	-	-	-	X	-	X	-	-

Tableau 5.3 - Registre des collectes d'échantillons de l'eau pour l'analyse chimique – 2019

	Total d'échantillon	2019-04-03	2019-04-17	2019-04-24	2019-05-08	2019-06-05	2019-06-18	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08	2019-08-29
Eau de surface	20												
L1&L2 - Silt	5	-	-	X	-	-	-	X	X	X	X	-	-
L3 - BC	7	-	-	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X
L4 - AB	8	X	X	X	-	-	-	X	X	X	X	X	-
Sol	15												
L1&L2 - Silt	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X
L3 - BC	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X
L4 - AB	5	-	-	-	X	X	X	-	X	-	-	-	X

Il est à noter que le nombre de tests réalisés pendant l'année de 2018 et moins important que celui de 2019 dû au problème de conception des drains de surface, rapporté dans la sous-section 4.4.2. Ensuite à la solution du problème, en 2019 l'occurrence de l'eau de ruissellement a augmenté. Le résumé des résultats est présenté dans les Tableau 5.4 au Tableau 5.6. Les valeurs limites des substances sont aussi disponibles dans les tableaux comme référence de contamination.

Tableau 5.4 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L1&L2

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2018-09-06	2018-09-13	2018-09-27	2018-10-10	2019-04-24	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22
Phénol	mg/L	0,085	<0,005	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	N/A	<0,002	0,0047
DBO5	mg O2/L	150	<3	<3	<3	<3	3	<4,0	<4,0	<5,3	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	0,13	0,2	<0,07	<0,07	0,26	<0,020	0,042	0,034	0,29
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,14	7,47	7,01	7,61	7,38	6,82	6,62	6,87	7,25
MES / MVES	mg/L	90	650	30	27	1400	8	8	8	150	120
Zinc	mg/L	0,17	0,105	<0,01	<0,05	0,185	0,025	0,012	0,01	0,024	0,075
		RPRT Critère A									
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	5,5	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tableau 5.5 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L3

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2018-10-10	2019-04-24	2019-05-08	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08	2019-08-29
Phénol	mg/L	0,085	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	0,0046	0,0074	0,0057
DBO5	mg O2/L	150	6	1	3	<4,0	<5,3	5,7	<5,3	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	<0,07	<0,07	<0,07	<0,020	<0,040	0,15	0,12	0,38
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,1	7,94	6,61	6,74	6,58	6,76	6,8	7,13
MES / MVES	mg/L	90	368	6	27	12	12	29	89	12
Zinc	mg/L	0,17	0,214	<0,02	<0,04	0,0086	0,016	0,033	0,017	0,023
RPRT Critère A										
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	3,8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Tableau 5.6 - Résultats de la contamination des eaux de ruissellement pour L4

Paramètres	Unité	REIMR Article 53 Valeurs limites	2019-04-03	2019-04-17	2019-04-24	2019-06-26	2019-07-02	2019-07-09	2019-07-22	2019-08-08
Phénol	mg/L	0,085	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	<0,002	<0,002	0,0035	0,0094
DBO5	mg O2/L	150	6	<3	14	<4,0	<5,3	<5,3	<4,0	<5,3
Azote ammoniacal	mg N/L	25	<0,07	0,21	<0,07	0,03	0,02	0,024	0,14	0,47
pH	-	supérieur à 6, mais inférieur à 9,5	7,24	7,78	7,41	6,6	6,78	6,74	6,75	6,39
MES / MVES	mg/L	90	10	<1	159	2	180	230	220	90
Zinc	mg/L	0,17	0,034	<0,02	0,031	0,023	0,041	0,046	0,029	0,019
RPRT Critère A										
Hydrocarbures pétrol. C10-C50	mg/L	300	<0,1	<0,1	N/A	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Les cellules en rouge identifient les points où la concentration de certains paramètres dépasse les valeurs limite, soit : le zinc et la MES. Il est observé que dans la cellule des lysimètres L1 et L2 (Tableau 5.4) les mêmes paramètres dépassent aussi la limite réglementaire, cependant, le matériau de remplissage est le recouvrement qui n'est pas classifié comme un sol contaminé. Ceci est un indice que les valeurs ponctuelles de zinc et MES que dépassent la limite n'ont pas un lien direct avec les sols contaminés (AB et BC). Concernant la matière en suspension, il est à noter qu'elle ne représente pas une menace significative puisqu'à long terme la poussée de la végétation peut la réduire. En tout cas, la continuation du suivi de ces paramètres est recommandée pour permettre des conclusions plus précises à long terme.

Il est important de dire que le facteur pH est vérifié étant donné que le guide d'intervention de la protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés allègue que le pH du sol a une influence non négligeable sur la mobilité des contaminants, surtout les métaux. L'intervalle de valeurs acceptable par le règlement est de 6 à 9,5. Les résultats obtenus jusqu'au moment montrent que les valeurs de pH détectés pour les échantillons de l'eau sont adéquates.

5.3.1.2 Analyse du sol

Le critère d'analyse de contamination des sols est basé sur les annexes I et II du règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT) et sur l'annexe du règlement de l'enfouissement des sols contaminés (RESC). Les tableaux avec les valeurs limites réglementaires et l'analyse chimique des échantillons des sols sont présentés dans l'Annexe 8.4. En bref, tous les paramètres soient : les métaux, les HAP, les hydrocarbures pétroliers; présentent une concentration inférieure au critère A. Alors, la contamination de surface est négligeable dans la première année. Pourtant, le contrôle de contamination doit continuer.

5.3.2 Taux de percolation de la première année

Comme montré par la sous-section 3.5.3, la percolation collectée au fond des lysimètres est mesurée avec les compteurs basculants, appelés aussi comme « Tipping Buckets » (TB). La période de suivi des mesures de percolation, pour ce mémoire, est de 29-06-2018 à 28-06-2019 (une année de fonctionnement du plan expérimental). La Figure 5.18 présente les registres de lectures des TB en comparaison avec la précipitation.

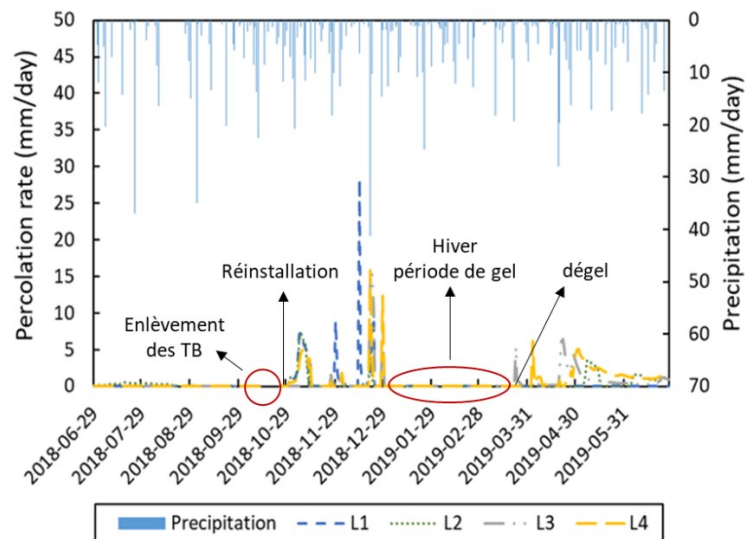


Figure 5.18 - Mesures des taux de percolation des 4 lysimètres par rapport à la précipitation

Il est à noter par les courbes qu'il existe des moments où les TB présentent des mesures de percolation et d'autres intervalles où la lecture est nulle. À partir du démarrage d'acquisition de données, durant les 4 premiers mois seulement le TB de L2 a présenté des mesures de

percolation, ce qui a été confirmé visuellement sur le terrain. C'est-à-dire que le L2 est le seul lysimètre à verser l'eau par le drain de fond. Pour la validation du comportement exclusif de L2, une auscultation est réalisée dans les tuyaux de drainage de fond (Figure 5.19 et Figure 5.20). Les images en vidéo ont montré que les tuyaux sont en bon état, sans fissures.

La planification d'opération du plan expérimental pour l'hiver prévoyait l'enlèvement des TB avant le début de périodes de température au-dessous de zéro, pour éviter des dommages à l'instrument qui est fabriqué en plexiglas. Dans ce but, les TB ont été retirés du terrain le 13-10-2019. Pourtant, lors d'une visite sur le plan expérimental à la date de 23-10-2018, il est constaté que tous les lysimètres versaient l'eau de percolation par le but des tuyaux de drainage. Ensuite à une vérification auprès le fabricant de l'applicabilité des TB au froid extrême, les compteurs ont été réinstallés sur le terrain à la date de 30-10-2018. L'intervalle sans les lectures dans cette période est remarqué dans la Figure 5.18.

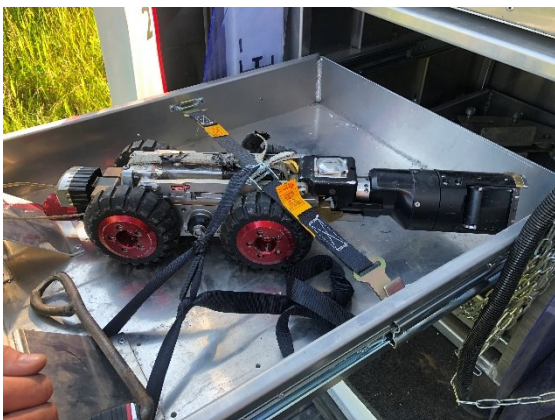


Figure 5.19 - Équipement pour l'auscultation



Figure 5.20 - Exécution de l'auscultation des tuyaux

Il est observé que les mesures de percolation ont été acquises jusqu'à la fin décembre. À partir de janvier, les températures chutent au niveau de gel et la percolation cesse. Ensuite, à la fin mars certaines journées présentent de températures plus modérées, alors, le dégel se produit puis les TB revient au fonctionnement. Il est important registrer qu'après le dégel le TB de L1 n'a plus enregistré des mesures de percolation tandis que sur le terrain l'écoulement par le drain existait. Alors, un problème avec l'instrument a été identifié et réparé pour la suite du projet.

Comme complément de validation du fonctionnement des TB, deux graphiques sont tracés pour les périodes où les percolations sont observées, soient : l'automne (Figure 5.21) et le printemps

(Figure 5.22). Il est possible à noter que les réponses de percolation fournies par les TB ont une relation avec la précipitation étant donné que les pics de percolation se passent ensuite aux journées de précipitation plus intense. Ceci est un bon indice de la performance des lysimètres et la capacité des TB de mesurer la percolation.

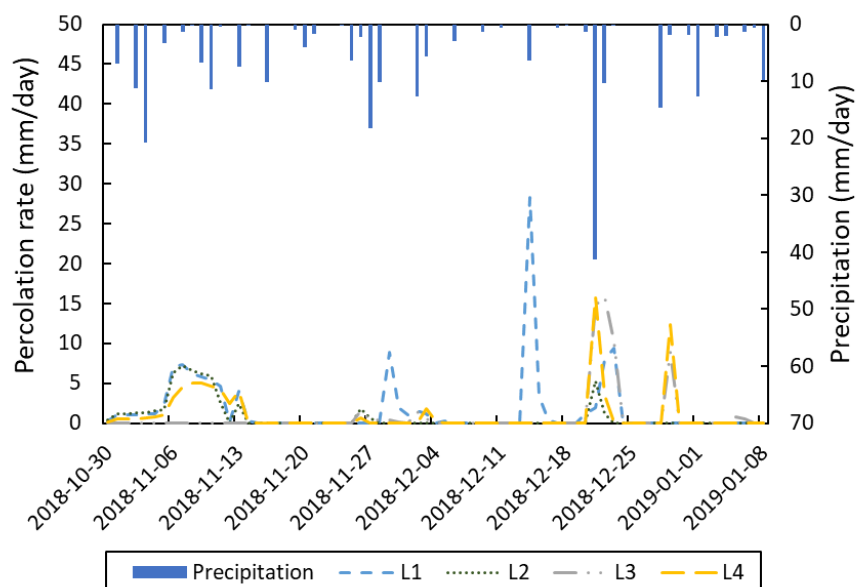


Figure 5.21 - Taux de percolation pour la période d'analyse à l'automne 2018

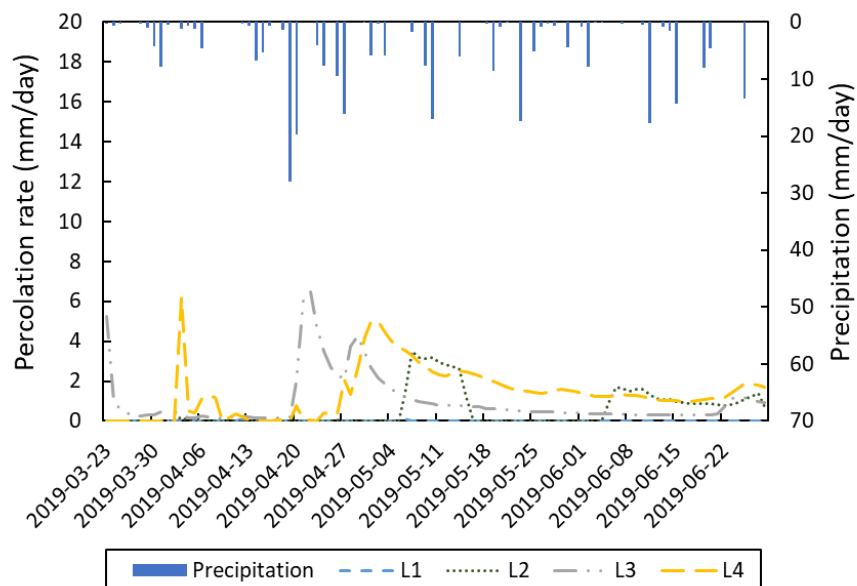


Figure 5.22 - Taux de percolation pour la période d'analyse au printemps 2018

La Figure 5.23 montre l'évolution cumulative de la percolation pour chaque lysimètre en comparaison à la précipitation enregistrée pour la même période d'analyse. Il est possible à noter que malgré les différences de configurations entre les lysimètres, ils mesurent des percolations dans le même ordre de grandeur pour cette première année de fonctionnement.

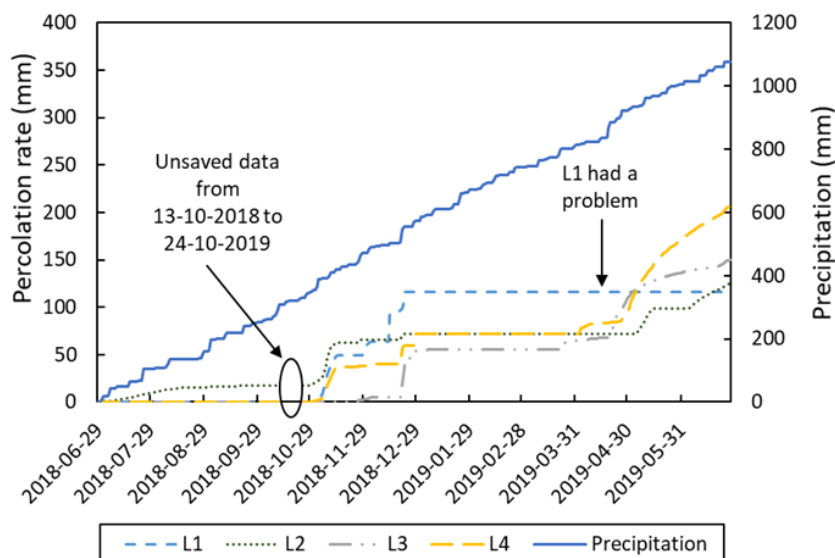


Figure 5.23 - Percolation cumulative pour la première année de fonctionnement du plan expérimental

D'ailleurs, le Tableau 5.7 présente le rapport en pourcentage entre la percolation et la précipitation. Le travail de Abichou et al [2012] indique que pour une couverture évapotranspirative les valeurs de percolations varient entre 17 à 24% de la précipitation. Dans ce contexte, les valeurs mesurées aux lysimètres jusqu'au moment sont légèrement inférieures à ceux fournis par la littérature.

Tableau 5.7 - Pourcentage du taux de percolation en fonction des précipitations annuelles

L1	L2	L3	L4
11 %	12 %	14 %	19 %

Les données préliminaires présentent certains indices et tendances, pourtant, il est précoce arriver à des conclusions de projet, étant donné que la première année est considérée comme une période d'ajustement du plan expérimental. Les réponses plus concrètes seront présentées aux futurs travaux du groupe de recherche.

6 Conclusion

Un plan expérimental est construit sur le site d'enfouissement à St-Nicéphore dans l'objectif global d'étudier les infiltrations dans le recouvrement final, puis proposer un reprofilage adéquat qui soit capable de réduire la production de lixiviat du site. Autour de ce scénario, ils existent aussi des objectifs scientifiques à étudier par le groupe de recherche. Cependant, l'objectif de ce travail de maîtrise se concentre sur l'étape fondamentale d'un projet de recherche de cette envergure : la conception en détails du plan expérimental; l'implémentation sur le terrain, soit la construction; et la validation de performance durant la première année de fonctionnement. Évidemment, sans la vérification de conformité de l'ensemble du plan expérimental, l'obtention des réponses scientifiques et l'accomplissement des besoins du partenaire industriel sont pratiquement non viables. Autrement dit, la suite du projet dépend 100% de l'étape initial.

Alors, ce mémoire présente toutes les étapes franchies dans ce projet pour atteindre l'objectif final de la maîtrise. Il débute par les activités préparatoires réalisées avant de la construction, soit : les prospections et sondages du sol du site; la caractérisation hydraulique/géotechniques des matériaux en laboratoire; la définition du design des lysimètres adéquat pour répondre les questions de la recherche; l'élaboration d'un plan d'instrumentation; et la vérification de la conformité des instruments achetés et la respective calibration. Ensuite, le mémoire décrit brièvement la phase de construction du plan expérimental, en mettant l'évidence sur les mécanismes de contrôle de qualité appliqués lors du déroulement des activités journalières de construction et installation d'instruments.

Malgré le critère rigoureux établi pour la conception du projet et le contrôle d'exécution réussi, la première année de fonctionnement du projet a montré qu'adaptations et perfectionnements devaient être réalisés sur le plan. Les problèmes affrontés et les solutions correspondants sont abordés aux chapitre 4 de ce mémoire. À cet égard, l'expérience pratique de terrain acquise en fonction des adaptations sur le plan expérimental présente des contributions significatives au milieu de la recherche. Parmi eux, le principal est le drain de fond des cellules. Étant donné qu'il entraîne une succion nulle à la base extérieure du lysimètre, sa performance peut être améliorée.

Il serait un ajout majeur à la méthode de Parent et al (2016) pour la conception de lysimètres. Il faut remarquer que l'analyse de l'influence du drain des cellules sur le fonctionnement des lysimètres fait partie du cadre d'étude d'autres intégrants du groupe de recherche à l'avenir.

Il est aussi à noter que des mécanismes et méthodes développées pour certains éléments du plan expérimental peuvent être réappliqués en autres occasions. Un bon exemple est la nouvelle procédure de saturation des tensiomètres. L'évaluation d'efficacité est encore en cours, mais les résultats présentés dans ce mémoire donnent un fort indice qu'elle soit adéquate. En plus, la découverte de l'influence solaire sur les tensiomètres T4e donne de contributions au fabricant, Meter Groupe, qui peut considérer le problème pour concevoir de nouveaux modèles adaptés.

Concernant l'interprétation des données de la première année d'acquisition, l'objectif défini dans le cadre de la maîtrise est la validation du fonctionnement de l'instrumentation. Les résultats présentés dans le chapitre 5 de ce mémoire montrent la nécessité d'ajustements ponctuels et guident le suivi des futures analyses. Les mesures de précipitation, de succion, de la teneur en eau, et de percolation indiquent une cohérence quand comparées entre eux. Autrement dit, elles atteignent le comportement théorique attendu et valident la capacité de tous les instruments pour représenter les phénomènes physiques qui se passent sur le terrain. D'ailleurs, les mesures de percolation faites jusqu'au moment se montrent cohérentes avec les valeurs décrites par la littérature scientifique. Ceci est un indice de bonne performance global du plan expérimental jusqu'à la rédaction de ce mémoire.

À propos des réponses préliminaires aux besoins du partenaire, il faut remarquer que les résultats de la première année de projet visent uniquement l'évaluation de tendances et fournir des indications pour les prochaines activités. Les rapports de suivi de contamination de surface n'ont pas identifié des valeurs significatives par rapport les limites réglementaires. Cependant, l'analyse chimique des échantillons d'eau et de sol doit continuer pour la suite du projet, et de cette façon obtenir des résultats conclusifs.

En bref, il est possible à conclure que le plan expérimental a été est bien implanté et perfectionné lors des adaptations réalisées après la construction. La procédure standard d'opération est établie et l'instrumentation est fonctionnelle.

En suivant le principe d'amélioration constant, quelques consignes sont suggérées pour que la continuation du projet suive la rigueur du travail bien fait. La qualité des données et la performance du plan expérimental dépendent de l'exécution de tâches proposées par la suite. Il est important à remarquer que cette liste d'activités est uniquement un sommaire des indications déjà décrit au long du texte de ce mémoire.

- La CRE du sol de type BC doit être corrigée selon le pourcentage de gravier du sol en état naturel selon la méthode proposée par Khaleel et Relyea [1997];
- La modélisation numérique est un élément fondamental pour la validation de la conception des lysimètres et pour l'obtention d'un modèle de prédiction d'infiltration calibré. Alors, une étude du logiciel doit être réalisée pour régler les problèmes de convergence affrontés;
- Les données de succion analysées jusqu'au moment sont obtenues par des tensiomètres T4e dont la calibration est encore en révision. Tous les graphiques de succion et de reconstitution de la CRE doivent être actualisés après la nouvelle calibration en cours;
- L'étude de l'influence solaire sur les tensiomètres doit être approfondie. Des tests peuvent être réalisés en laboratoire et sur le chantier pour l'identification d'élément sensible à la radiation. En plus, le critère de traitement doit être perfectionné pour les données de succion de 2019 qui présentent encore la distorsion des lectures;
- L'influence du drain des cellules ajouté aux lysimètres doit être étudiée à l'aide de la modélisation numérique;
- Le suivi de l'efficace de la méthode de saturation des tensiomètres doit continuer;
- De nouvelles sondes de teneur en eau et de succion peuvent être installées dans L3 et L4 en différents niveaux (dans la couche de sol contaminé) pour permettre la reconstitution de la CRE des sols AB et BC à l'échelle du terrain. Les paramètres hydrauliques (du sol) obtenus lors de la reconstitution seront utiles pour les futures modélisations numériques.

7 Bibliographie

- Abdolahzadeh, A. M., Vachon, B. L. et Cabral, A. R. (2011) Assessment of the design of an experimental cover with capillary barrier effect using 4 years of field data. *Geotechnical and Geological Eng. J.*, vol. 29, n°5, p. 783-802.
- Abichou, Tarek, Jubily Musagasa, Lei Yuan, Jeff Chanton, Kamal Tawfiq, Donald Rockwood, and Louis Licht. (2012). Field Performance of Alternative Landfill Covers Vegetated with Cottonwood and Eucalyptus Trees. *International Journal of Phytoremediation* 14, p.47–60.
- Albright, W. H. et Benson, C. H. (2002) Alternative Cover Assessment Program 2002 Annual Report. U.S. Environmental Protection Agency.
- Antinoro, C., Bagarello, V., Ferro, V., Giordano, G. et Iovino, M. (2014) A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the Arya–Paris model. *Geoderma*, vol. 213, p. 226–234.
- Arya, L. M., Leijse, F. J., van Genuchten, M. T. et Shouse, J. P. (1999) Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution, p. 510-511-519.
- Arya, L. M. et Paris, J., F. (1981) A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 45, p. 1023-1030.
- Aubertin, M., Mbonimpa, M., Bussiere, B. R. et Chapuis, R. (2003) A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, n°6, p. 1104-1122.
- Benson, C., Abichou, T., Albright, W. H., Gee, G. et Roesler, A. (2001) Field evaluation of alternative earthen final covers. *International J. of Phytoremediation*, vol. 3, n°1, p. 1-21.
- Benson, C., Bosscher, P., Lane, D. et Pliska, R. (1994) Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill covers.
- Bews, B. E., O’Kane, M. A., Wilson, G. W., Williams, D. et Currey, N. (1997) The design of a low flux cover system, including lysimeters, for acid generating waste rock in semi-arid environments., vol. II, p. 747-762.
- Boszczowski, R. (2008) Avaliação de propriedades mecânicas e hidráulicas de um perfil de alteração de granito-gnaiss de Curitiba, PR. Thèse de doctorat, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
- Brooks, R. H. et Corey, A. T. (1964) Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper no. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

- Burdine, N. (1953) Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, vol. 5, n°3, p. 71–78.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2005). Sols: détermination de la masse volumique du sol en place selon la méthode du cône de sable, p. 8.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2013). Sols : détermination de la relation teneur en eau-masse volumique sèche est obtenue à l'aide d'un essai avec énergie de compactage normale (600 kN*m/m³), p. 17.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2014a). Sols : Analyse granulométrique des sols inorganiques, p. 27.
- Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2014b). Sols : détermination de la densité des particules solides, p. 8.
- Cabral, A. Simard, V. et Duarte. M. 2019. Design, construction and monitoring of large scale lysimeters to assess seepage through experimental fin cover designs. 17TH International Waste Management and landfill symposium, Italie,
- CCME, D. générale des services intégrés (2002) Lignes directrices nationales sur les sites d'enfouissement de déchets dangereux.
- Chiu, T.-F. et Shackelford, C. D. (2000) Laboratory evaluation of sand underdrains. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 126, n°11, p. 990–1001.
- Decagon Devices. (2005). Mini disk infiltrometer: User's manuals, version 1:3. Decagon Devices Inc, p. 20.
- Durner, W. (1992) Predicting the unsaturated hydraulic conductivity using multi-porosity water retention curves. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils, p. 185–202.
- Fredlund, D. G. et Rahardjo, H. (1993) Soil mechanics for unsaturated soils. N.Y., Wiley,.
- Fredlund, D. G. et Xing, A. Q. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 31, n°4, p. 521-532.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G. et Wilson, G. W. (2000) An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 37, n°4, p. 817-827.
- Gardner, W. R. (1958) Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil science*, vol. 85, n°4, p. 228–232.
- Gouvernement du Québec. (2018a). Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2019/> (page consultée le 7 octobre 2018) .

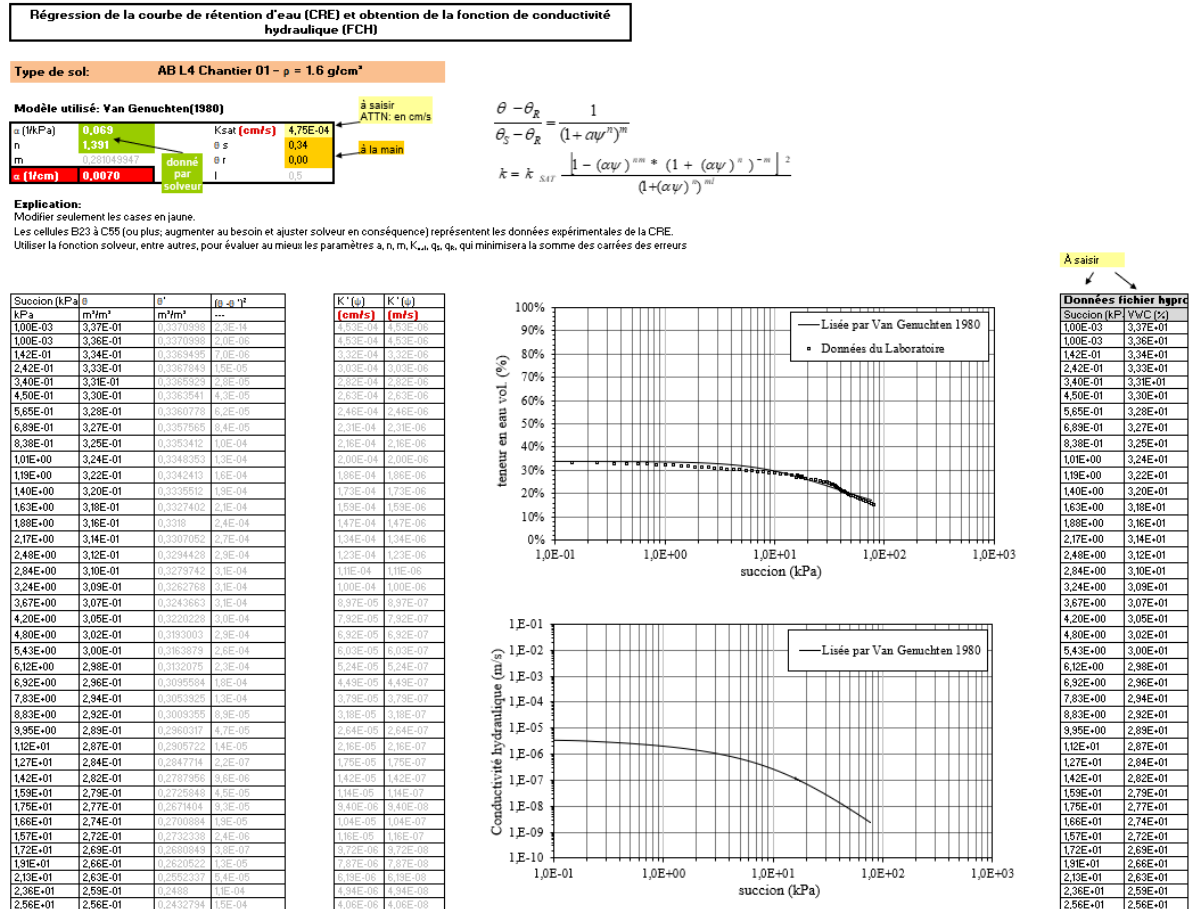
- Gouvernement du Québec. (2018b). Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2037> (page consultée le 7 octobre 2018) .
- Gouvernement du Québec. (2018c). Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2,%20r.%2018/> (page consultée le 7 octobre 2018).
- Holtz, R. D. et Kovacs, W. D. (1991) Introduction à la géotechnique. Presses inter Polytechnique.
- Hoskin Scientifique (2019). 5TM Soil moisture and Temperature. https://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main_page=product_info&cPath=1_59_71_201&products_id=2815 (page consulté l'août 2019)
- Hoskin Scientifique (2019). Tensiomètre pour opération continue annuelle T4. http://www.hoskin.qc.ca/catalog/index.php?main_page=product_info&cPath=1_59_66_202_206&products_id=321 (page consulté l'août 2019)
- Hoskin Scientifique (2019). Tipping Counter Tipping Counter - KIPP100 [E-802-KIPP100]. Compteur de basculement. https://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main_page=product_info&products_id=1874 (page consulté l'août 2019)
- INPL (2019). Propriétés Mécaniques et Physiques des Sols. Le numérique à l'Université de Lorraine. http://tice.inpl-nancy.fr/modules/sciences_techniques/Proprietes-Meca-Sols/chap7/remontees.html. (page consulté le juin 2019)
- ICT Internacional (2019). EM50|ICT. Enregistreur de données EM50. <http://www.ictinternational.com/products/em50/em50-data-logger/> (page consulté l'août 2019)
- Izzo, R. L. S. et Nagalli, A. (2013) O desafio da geotecnia frente às questões ambientais.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. et Van Woerden, F. (2018) What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.
- Khaleel, R. et Relyea, J. F. (1997) Correcting laboratory-measured moisture retention data for gravels. Water resources research, vol. 33, n°8, p. 1875–1878.
- Khire, M. V., Benson, C. H. et Bosscher, P. J. (2000) Capillary barriers: Design variables and water balance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 126, n°8, p. 695-708.
- Kisch, M. (1959) The theory of seepage from clay-blanketed reservoirs. Géotechnique, vol. 9.

- Lacroix Vachon, B. (2008) Les écoulements dans les Milieux non Saturés et leurs Applications aux Couvertures avec Effet de Barrière Capillaire Installées dans un Site d'enfouissement Sanitaire Dissertation. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 138 p.
- McCartney, J. S. et Zornberg, J. G. (2007) Hydraulic interaction between geosynthetic drainage layers and unsaturated low plasticity clay. Geotechnical Special Publication, p. 3. American Society of Civil Engineers, Reston, VA 20191-4400, United States.
- MDDELCC. (2016). Guide d'intervention relatif à la protection des sols et la réhabilitation des terrains contaminés. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/guide-intervention/> (page consultée le 8 octobre 2018).
- MDDELCC. (2017). Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés et plan d'action 2017-2020. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/politique.pdf> (page consultée le 7 octobre 2018).
- Meter Environnement (2017). Mini Disk Infiltrimeter. Conductivité Hydraulique Insaturé. <https://www.metergroup.com/environment/products/mini-disk-infiltrimeter/> (page consulté l'août 2019)
- Meter Group AG. (2011). User manuel T4/T4e, p. 44
- Meter Group AG. (2015). Operation manual Hyprop, p. 97
- Meter Group AG. (2017.) Operation manual Ksat, p. 42
- Mijares, R. G., Khire, M. V. et Johnson, T. (2011) Field-scale evaluation of lysimeters versus actual earthen covers. Geotechnical Testing Journal, vol. 35, n°1, p. 31–40.
- Morris, C. E. et Stormont, J. C. (1999) Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, vol. 125, n°12, p. 1057-1065.
- Mualem, Y. (1976) A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, vol. 12, p. 513-522.
- Parent, S. E., Cabral, A., Gras, G. et Marinho, F. (2006) Design and installation of zero-tension lysimeters in an inclined cover. Geotechnical Special Publication, p. 625-633. Geotechnical Special Publication 147, American Society of Civil Engineers.
- Parent, S.-É. et Cabral, A. R. (2006) Design of inclined covers with capillary barrier effect. Geotechnical and Geological Engineering J., vol. 24, p. 689-710.
- Parent, S.-É., Cabral, A. R. et Zornberg, J. G. (2007) Water retention curves and hydraulic conductivity functions of highly compressible materials. Canadian Geotechnical Journal, vol. 44, n°10, p. 1200-1214.

- Penman, H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 193, n°1032, p. 120–145.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics, volume 1, numéro 5, p. 318-333.
- Ross, B. (1990) Diversion capacity of capillary barriers. Water Resources Research, vol. 26, n°10, p. 2625-2629.
- Schindler, U., Durner, W., Von Unold, G. et Müller, L. (2010) Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range. Soil Science Society of America Journal, vol. 74, n°4, p. 1071-1083.
- Sobrinho, N. L. C. (2000) Uma Análise do Balanço Hídrico do Aterro Sanitário de Presidente Prudente, p. 125.
- Souza Pinto, C. de (2000) Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo, Oficina de Textos.
- Statistique Canada, S. C. (2012) L'activité humaine et l'environnement.
- Van Genuchten, M. T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. Soil science society of America journal, vol. 44, n°5, p. 892–898.
- Wind, G. P. (1966) Capillary conductivity data estimated by a simple method. [sn].
- Zhang, R. (1997) Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 61, p. 1024- 1030.
- Zhu, Y., Fox, R. H. et Toth, J. D. (2002) Leachate collection efficiency of zero-tension pan and passive capillary fiberglass wick lysimeters. Soil science of America journal, vol. 66, p. 37-43.
- Zhuang, J., Jin, Y. et Miyazaki, T. (2001) Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. Soil Science, vol. 166, n°5, p. 308-321.
- Nom1, P. (2000). Titre du rapport (Type et numéro). Nom de l'institution et du département ou Nom de la maison d'édition, Lieu de publication, 234 p.

8 Annexes

8.1 FICHIER EXCEL DE LISSAGE DE LA CRE



8.2 DONNÉES DE TERRAIN PAR LYSIMÈTRE

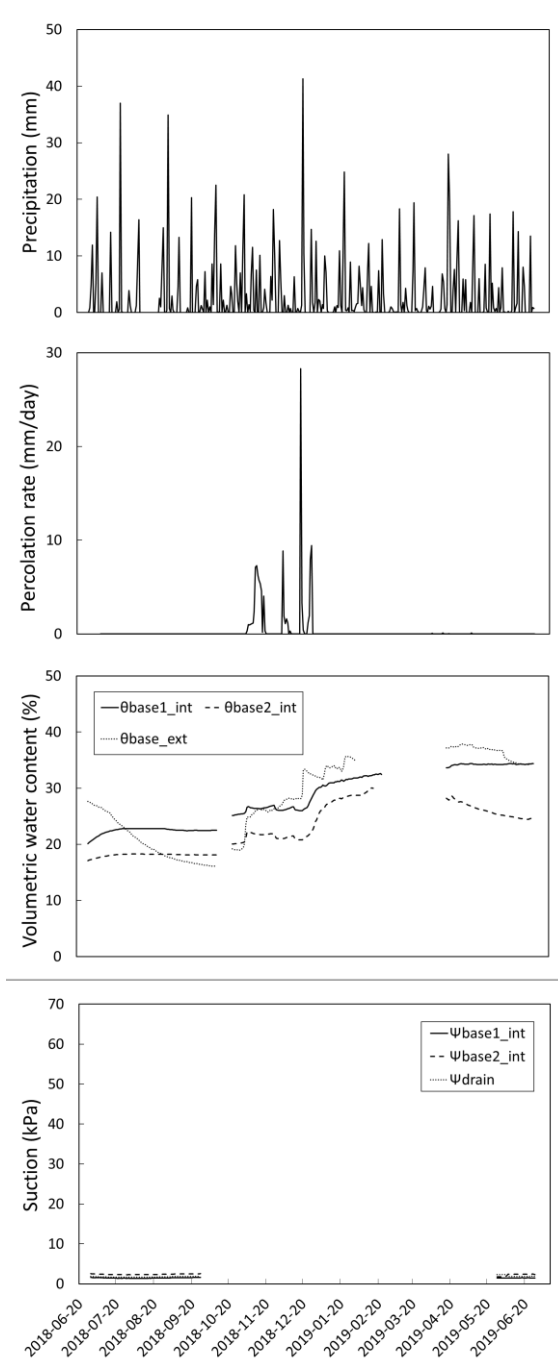


Figure 8.1 - Précipitations, percolation, teneur en eau et suction pour L1

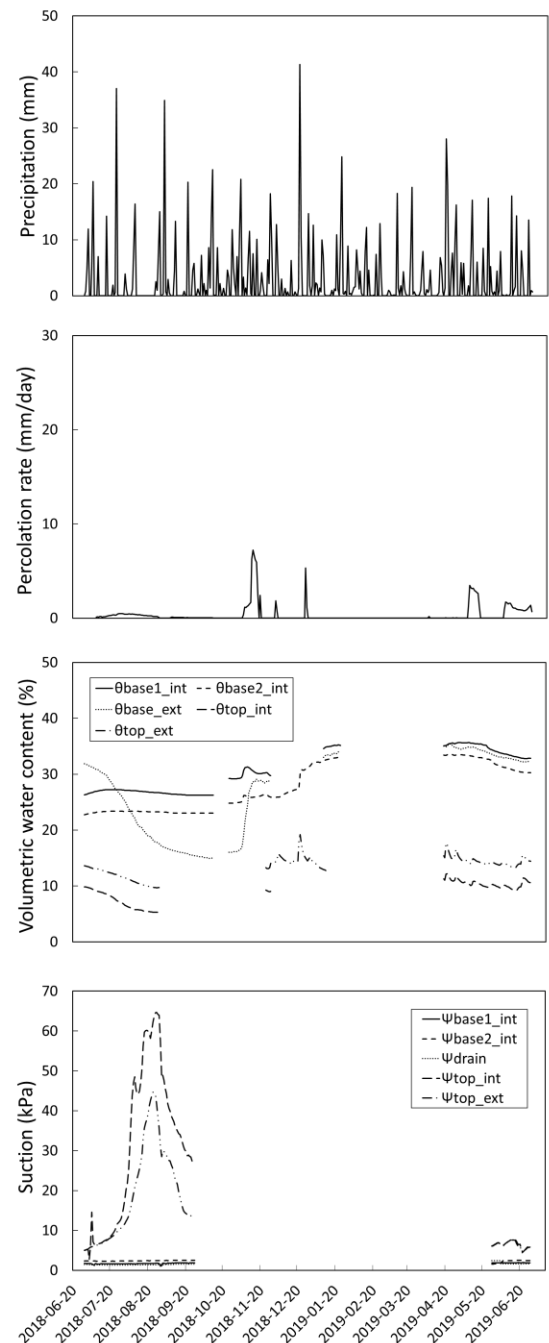


Figure 8.2 - Précipitations, percolation, teneur en eau et suction pour L2

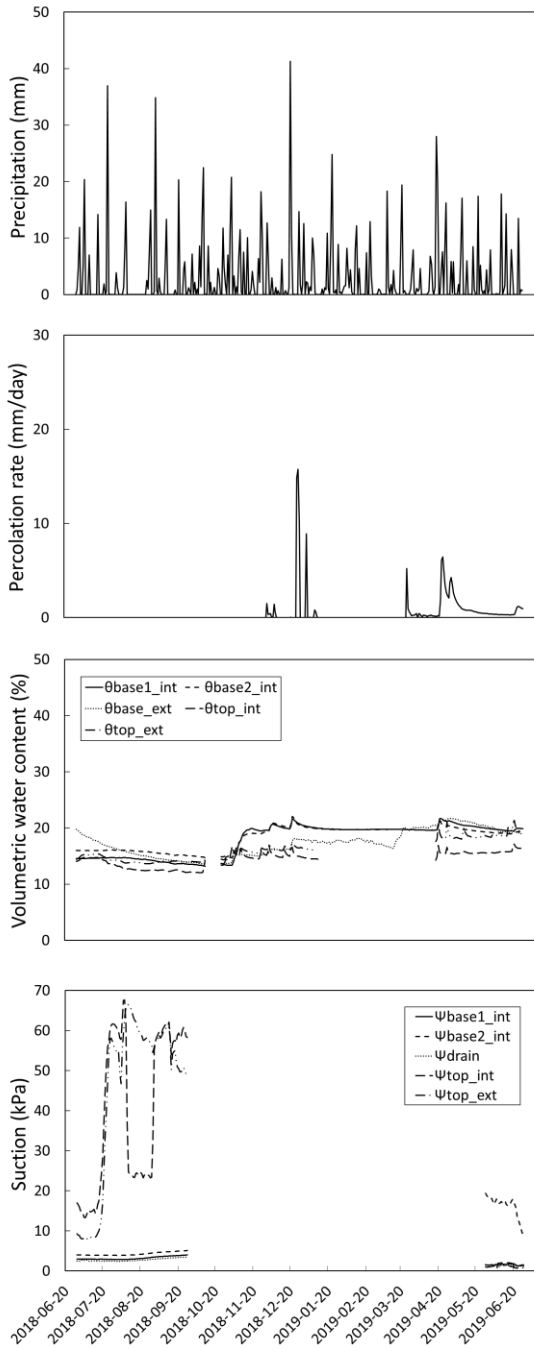


Figure 8.3 - Précipitations, percolation, teneur en eau et suction pour L3

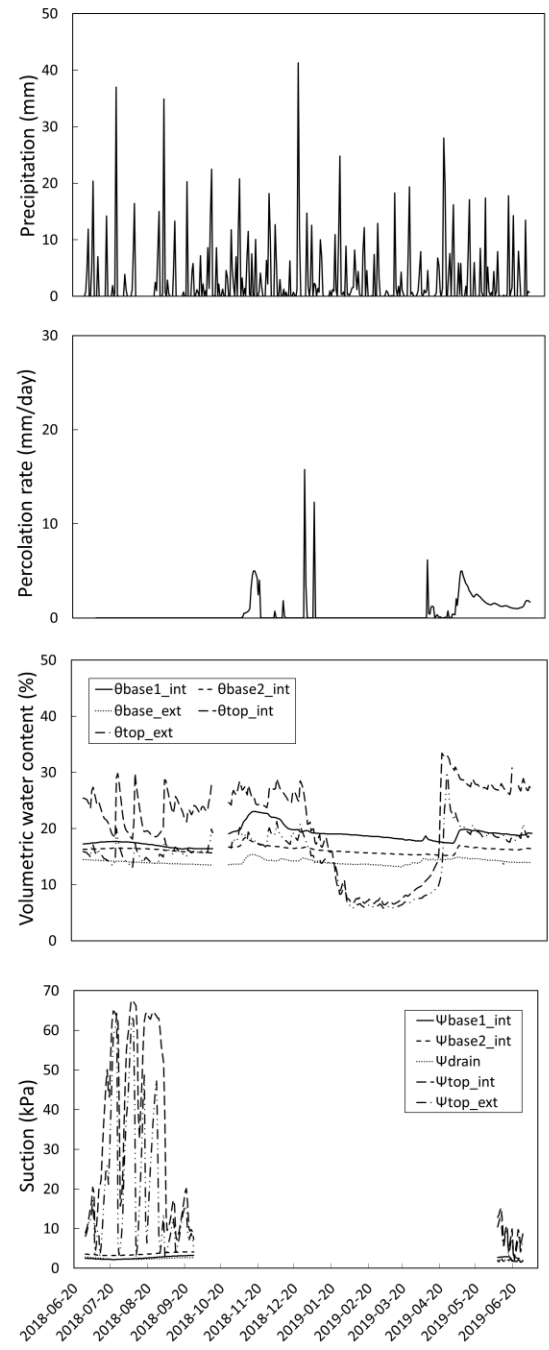


Figure 8.4 - Précipitations, percolation, teneur en eau et suction pour L4

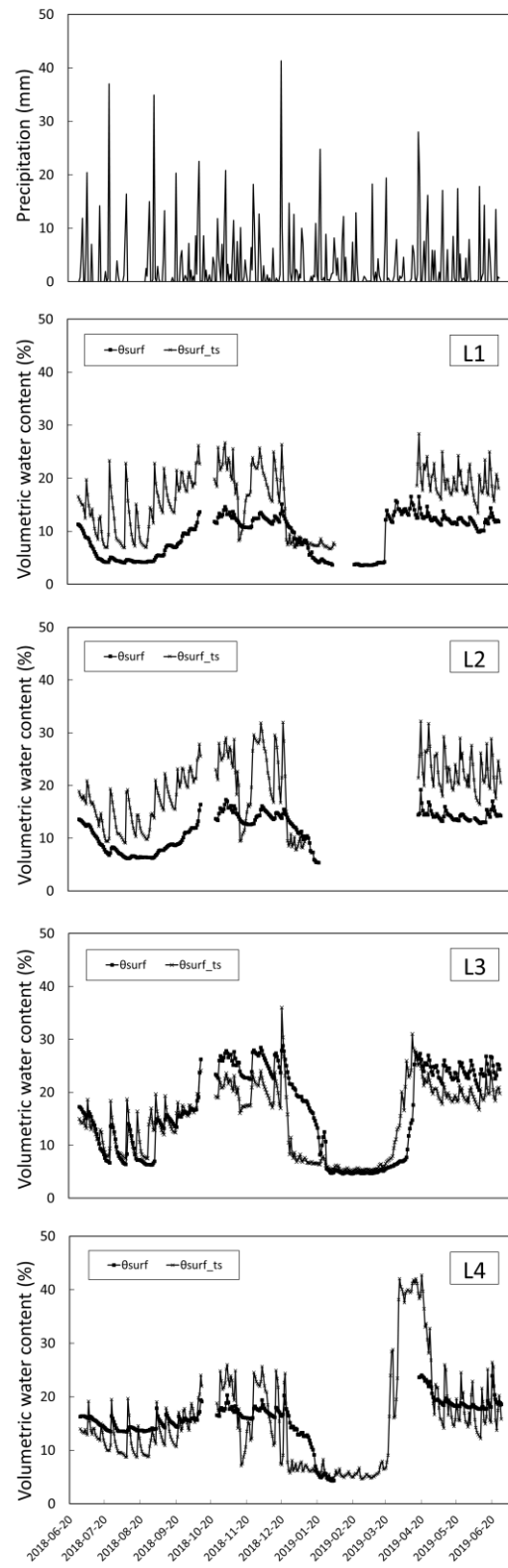


Figure 8.5 - Données de sondes de surface (couche évapotranspirative)

8.3 SUIVI DE FONCTIONNEMENT DE L'INSTRUMENTATION

Lysimètres	Boîte	Port 1		Port 2		Port 3		Port 4		Port 5		Commentaires
		Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	
L1	LC3_TNC1	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		2019-02-25	2019-04-17	2019-02-18	2019-04-17	2019-02-03	2019-04-17	2019-02-05	2019-02-22	2019-02-08	2019-04-17	Déconnexion due au poids de la neige
L2	FC1_EC2	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		2018-11-29	2019-01-10	-	-	2018-11-28	2019-01-10	-	-	-	-	Déconnexion due au poids de la neige
	LC2_EC1	2019-01-25	2019-04-17	2019-01-23	2019-04-17	2019-01-25	2019-04-17	2019-01-24	2019-04-17	2019-01-11	2019-04-17	Déconnexion due au poids de la neige
		-	-	-	-	-	-	2019-06-03	2019-06-06	-	-	Problème de connexion
		-	-	-	-	-	-	2018-08-30	2019-04-17	2018-08-30	2019-04-17	Déconnexion due au poids de la neige
L3	LC2_EC1	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
	EM41417	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		-	-	-	-	2019-01-13	2019-04-17	2019-01-12	2019-04-17	-	-	Déconnexion due au poids de la neige
L4	EM41551	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		-	-	-	-	-	-	2019-06-12	2019-06-17	-	-	Problème de connexion
	FC3-ENC2	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	2018-10-13	2018-10-24	Erreur de communication pour la préparation du terrain.
		2019-02-04	2019-04-17	-	-	-	-	-	-	-	-	Déconnexion due au poids de la neige

Lysimètre	Boîte	Début au printemps 2018	Arrêt à l'automne 2018	Début au printemps 2019
L1	DL6 - 01	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
L2	DL6 - 01	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
	DL6 - 02	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
L3	DL6 - 02	2018-06-27	2018-09-27	2019-05-28
	DL6 - 03	2018-06-27	2018-09-27	2019-06-07
L4	DL6 - 03	2018-06-27	2018-09-27	2019-06-07

Lysimètre	Début au printemps 2018	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
L1	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	2019-05-16	2019-06-05
L2	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	2018-08-21	2018-08-28	2019-05-16	2019-06-05
L3	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	-	-
L4	2018-06-13	2018-10-11	2018-10-29	-	-	-	-

8.4 SUIVI DE CONTAMINATION DES SOLS DE SURFACE

Tableau 8.1 - Résultats de la contamination des sols pour L1&L2

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec					
					L1&L2	L1&L2	L1	L2	L1&L2	L1&L2
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)										
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	3,2	3,2	2,6	3	2,7	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	19	16	13	16	12	20
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	12	12	10	11	<10	13
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	<10	3.5
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	<10	<10	5.2
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	122	145	110	98	106	140
Mercuré (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	19	20	17	14	15	19
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	<10	5.3
Sélénium (Se)	1	3	10	50	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	14	22	15	13	12	19
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)										
Acénaphthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (bjk) fluoranthène	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
(Somme) ⁵	-	-	-	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphtalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	56	-	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS										
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	300	700	3 500	10 000	<100	<100	<100	<100	<100	<100

Tableau 8.2 - Résultats de la contamination des sols pour L3

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec				
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)									
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	3,6	3	3,7	4.5	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	18	16	18	120	21
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	13	12	14	14	14
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	4.1
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	26	6.4
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	143	126	144	512	170
Mercure (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	20	18	20	25	21
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	5.9
Sélénium (Se)	1	3	10	50	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	15	16	18	64	22
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)									
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b,j,k) fluoranthène (Somme) ⁵	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphtalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	56	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS									
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	300	700	3 500	10 000	<100	<100	<100	<100	<100

Tableau 8.3 - Résultats de la contamination des sols pour L4

Paramètres	Valeurs limites ou Concentration maximale acceptable				Concentration en mg/kg poids sec				
	Critère A	Critère B / Annexe I du RPRT	Critère C / Annexe II du RPRT	Annexe I du RESC	2018-08-20	2018-09-20	2018-10-10	2019-05-08	2019-06-05
MÉTAUX (et métalloïdes)									
Argent (Ag)	2	20	40	200	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.50
Arsenic (As)	6	30	50	250	10,9	3,5	2,8	2,9	<5.0
Baryum (Ba)	340	500	2 000	10 000	19	19	15	14	17
Cadmium (Cd)	1,5	5	20	100	<0.9	<0.9	<0.9	<0.9	<0.50
Chrome total (Cr)	100	250	800	4 000	13	13	12	<10	11
Chrome VI (Cr ⁶⁺)	-	6	10	-	-	-	-	-	-
Cobalt (Co)	25	50	300	1 500	<10	<10	<10	<10	3
Cuivre (Cu)	50	100	500	2 500	<10	<10	<10	<10	4.5
Étain (Sn)	5	50	300	1 500	<5.0	<5.0	<5.0	<5.0	<4.0
Manganèse (Mn)	1 000	1 000	2 200	11 000	126	133	104	105	120
Mercuré (Hg)	0,2	2	10	50	-	-	-	-	-
Molybdène (Mo)	2	10	40	200	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.0
Nickel (Ni)	50	100	500	2 500	19	18	16	15	16
Plomb (Pb)	50	500	1 000	5 000	<10	<10	<10	<10	<5.0
Sélénium (Se)	1	3	10	50	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<1.0
Zinc (Zn)	140	500	1 500	7 500	16	17	14	13	17
HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES (HAP)									
Acénaphène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Acénaphthylène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Anthracène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (a) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (j) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (k) fluoranthène	0,1	1	10	-	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (b) fluoranthène (Sommation) ⁵	-	-	-	136	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (c) phénanthrène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Benzo (g,h,i) pérylène	0,1	1	10	18	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrysène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) anthracène	0,1	1	10	82	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,h) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,i) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Dibenzo (a,l) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-1,3 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Diméthyl-7,12 benzo (a) anthracène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluoranthène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Fluorène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Indéno (1,2,3-cd) pyrène	0,1	1	10	34	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-1 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-2 naphthalène	0,1	1	10	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Méthyl-3 cholanthrène	0,1	1	10	150	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Naphtalène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Phénanthrène	0,1	5	50	56	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Pyrène	0,1	10	100	100	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Triméthyl-2,3,5 naphthalène	0,1	1	10	56	-	-	-	<0.10	<0.10
PARAMÈTRES INTÉGRATEURS									
Hydrocarbures Pétroliers (C ₁₀ à C ₅₀)	300	700	3 500	10 000	116	105	<100	<100	<100